

ESTRUCTURA CORTICAL DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA Y SUS IMPLICACIONES EN LA CUENCA CESAR-RANCHERÍA

CAROLINA CASTAÑO URIBE

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera geóloga

Dirección:

Ing. Geóloga Isabel Restrepo Correa

MSc. Ciencias de la tierra



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA GEOLÓGICA
ENVIGADO
2019**

AGRADECIMIENTOS

A Ecopetrol por permitirme usar el software Oasis Montaj ®, especialmente a Antonio Velásquez y Fabio Santamaria por su acompañamiento.

A Isabel Restrepo por su acompañamiento en el desarrollo de este trabajo de grado.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. PRELIMINARES	12
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Objetivos del proyecto	14
1.2.1 Objetivo General	14
1.2.2 Objetivos Específicos.....	14
1.3 Marco de referencia	14
1.3.1. Antecedentes (MARCO GEOTECTÓNICO)	14
1.3.2. Cuenca Cesar Ranchería	22
1.4. Marco teórico	26
1.4.1. Métodos geofísicos	26
1.4.2. Procesamiento de datos gravimétricos	28
1.4.3. Construcción del modelo	33
1.4.4. Ajuste.....	37
2. METODOLOGÍA	38
2.1. Construcción de la base de datos geológica y geofísica	38
2.1.1. Recopilación y organización de la información geológica y geofísica	38
2.1.2. Preprocesamiento de datos geofísicos	39
2.1.3. Definición de la escala de trabajo.....	42
2.1.4. Control de calidad de la información	43

2.2.	Construcción de modelo geológico.....	44
2.2.1.	Diseño del modelo geológico.....	44
2.2.2.	Estimación de los parámetros de entrada.....	46
2.2.3.	Implementación de algoritmos para cálculo de señal geofísica sintética	47
2.2.4.	Mapa de anomalía de Bouguer	48
2.3.	Modelamiento directo	51
2.3.1.	Parámetros de entrada	51
2.3.2.	Cálculo del error cuadrático y ajuste al error mínimo.....	53
2.4.	Interpretación del modelo.....	54
2.4.1.	Atributos gravimétricos	54
3.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	55
4.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES.....	67
	REFERENCIAS.....	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. *Datos para modelo gravimétrico de Cerón (2007)*

Tabla 2. *Cuerpos del modelo directo con el valor de densidad utilizado, litología y el rango de densidad según la literatura*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Compensación isostática a) según Airy b) según Pratt Tomada de (Lowrie, 2013)	13
Figura 2. Mapa geológico propuesto por Tschanz et al. (1974) para la SNSM. Se observan las tres provincias geotectónicas propuestas y sus límites.	16
Figura 3. Modelo de Cediel (2003). C&R Basin = Cuenca Cesar Ranchería; UPz = Paleozoico Superior; LPz = Paleozoico Inferior; Jr = Jurásico; K = Cretácico; P= Paleogeno; N = Neogeno.	17
Figura 4. Modelo conceptual de pivote de Montes et al. (2005).....	18
Figura 5. Modelo de Montes et al. (2010). a) configuración actual b) 23° de rotación c) 30° de rotación.....	18
Figura 6. Modelo regional realizado por Sanchez & Mann (2014) para inferir la estructura cortical bajo la SNSM y la cuenca Cesar Ranchería	19
Figura 7. Datos de tiempo de exhumación con trazas en apatitos. Tomada de Villagómez et al. (2011)	21
Figura 8. Localización de la cuenca Cesar Ranchería. La imagen de fondo es un modelo de elevación digital de Topex (University of California, 2019) y las fallas y su simbología son del mapa geológico de Colombia (Gómez Tapias et al., 2015).	22
Figura 9. Estratigrafía de las subcuencas Cesar y Ranchería. Tomado de (García et al., 2007)	23
Figura 10. Anomalía gravimétrica de la Tierra, satélite Grace (NASA, 2004).....	28
Figura 11. Correcciones a los datos a) de terreno b) Bouguer c) Free Air d) resultado. Luego de las correcciones, las aceleraciones medidas en las estaciones P y Q pueden compararse con el valor teórico de la gravedad en el elipsoide de referencia.	30
Figura 12. Modelo geológico y su respuesta gravimétrica (Geofísica Argentina, 2015)....	33
Figura 13. No unicidad de la solución en el modelamiento gravimétrico. Tomado de (Marescot, 2005)	35
Figura 14. Organización de la información geológica y geofísica en bases de datos .gdb	38

Figura 15. Líneas de vuelo de adquisiciones aerogravimetría y aeromagnetometría. ANH (2007)	39
Figura 16. Continuación hacia arriba de los grids de 1500 y 1220 msnm a 6380 msnm	Error! Bookmark not defined.
Figura 17. Datos de gravedad observada para el perfil modelado. Espaciamiento entre datos (cruces +) 2.2km.	43
Figura 18. Histograma de frecuencias de anomalías de bouguer por adquisiciones	43
Figura 19. Mapa geológico y perfil geológico-geofísico. Nomenclatura del mapa geológico de Colombia 2015 del SGC (Edad + Litología + Terreno geológico).	45
Figura 20. YSE corteza continental. Tomado de (Burg, 2017) Error! Bookmark not defined.	
Figura 22. Rangos de valores de densidad de rocas según litología. Tomado de (Hinze et al., 2013).	47
Figura 23. Extensión lateral del modelo de gm sys (aprox 30.000km a cada lado) para evitar los efectos de borde.....	48
Figura 24. Grid knitting método blending. Tomada de (Geosoft, 2013)	49
Figura 25. Grid knitting método Suture. Tomada de (Geosoft, 2013)	50
Figura 26. Geología superficial del perfil modelado	51
Figura 27. Mapa de anomalía de Bouguer	56
Figura 28. Señal analítica. Los valores varían de 0 a 0.031, no tienen interpretación cuantitativa, la inflexión indica las estructuras o contactos.....	58
Figura 29. Derivada generalizada con azimuth 0°. Los valores tienen un rango entre -1 y 1, no tienen una interpretación cuantitativa pero el 0 es aproximadamente el borde de los cuerpos o corresponde a las estructuras.	60
Figura 30. Derivada generalizada azimuth 45°. Los valores tienen un rango entre -1 y 1, no tienen una interpretación cuantitativa pero el 0 es aproximadamente el borde de los cuerpos o corresponde a las estructuras.	61
Figura 31. Derivada generalizada azimuth 90°. Los valores tienen un rango entre -1 y 1, no tienen una interpretación cuantitativa pero el 0 es aproximadamente el borde de los cuerpos o corresponde a las estructuras.	62

Figura 32. Derivada tilt. Los valores van de -1.56 a 1.56 radianes (equivalente a ± 90 grados), se debe a los valores posibles de tangente inversa. No tiene interpretación cuantitativa, los bordes o estructuras se interpretan cuando el ángulo tilt es cero. 64

Figura 33. Modelo de la SNSM y cuenca Cesar Ranchería 65

RESUMEN

Para explicar la evolución geológica de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) se han propuesto distintos modelos que incluyen: un despegue a escala cortical intermedia de fallas que permiten el levantamiento debido al movimiento al noroeste de la subplaca de Maracaibo (Audemard & Audemard, 2002; Cediel et al. 2003) y la rotación de un cuerpo que se emplaza al norte de Colombia como consecuencia de la colisión y cabalgamiento de la SNSM sobre la boyante placa del Caribe (Montes et al., 2005; Montes et al., 2010).

Se realiza un modelamiento directo utilizando un modelo conceptual modificado de Audemard & Audemard (2002) y Cediel et al. (2003) que propone el detachment pero no un engrosamiento cortical, puesto que la anomalía gravimétrica no lo sugiere (+200 mGal). El modelo incluye una cuña mantélica y un basculamiento al sureste que serían responsables de la anomalía. Se interpretan estructuras gracias a atributos gravimétricos (tilt, derivada generalizada y señal analítica) que son incluidas en el modelamiento, como el lineamiento de Sevilla y la falla de Orihueca. Además, se interpreta una compartimentalización de la falla Oca – El Pilar.

El modelo propuesto sugiere una evolución tectónica de la SNSM y la cuenca Cesar Ranchería común, relacionándolos en un mismo elemento tectónico (subplaca de Maracaibo), debido al desarrollo de las estructuras del despegue y a las facies sedimentarias y su relación con los períodos de exhumación de la SNSM.

Un Moho somero implicaría una anomalía térmica y flujos de calor mayores a los típicos. Este hecho tendría implicaciones en los sistemas petrolíferos de las cuencas adyacentes a la SNSM y podría explicar la presencia de carbones bituminosos y antracitas en la cuenca Cesar Ranchería.

Palabras clave: Sierra Nevada de Santa Marta, Cuenca Cesar Ranchería, gravimetría, modelamiento directo.

ABSTRACT

To explain the geological evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) different models have been proposed, including: an intermediate cortical scale *detachment* that allows the lifting due to the movement to the northwest of the subplate of Maracaibo (Audemard & Audemard, 2002; Cediel et al., 2003) and the rotation of the body located in northern Colombia as a consequence of the collision and overrun of the SNSM on the Caribbean plate (Montes et al., 2005, Montes et al., 2010).

Direct modeling is carried out using a modified conceptual model of Audemard & Audemard (2002) and Cediel et al. (2003) that proposes the detachment but not a cortical thickening, since the gravimetric anomaly does not suggest it (+200 mGal). The model includes a mantle wedge and a tilt to the southeast that would be responsible for the anomaly. Structures are interpreted thanks to gravimetric attributes (tilt, generalized derivative and analytical signal) that are included in the modeling, such as Sevilla's lineament and Orihueca fault. Besides, the fault Oca El Pilar is interpreted as compartmentalized.

The proposed model suggests a common tectonic evolution of the SNSM and the Cesar Ranchería basin, relating them with the same tectonic element (Maracaibo's subplate), due to the development of the structures of the takeoff and the sedimentary facies and their relationship with the exhumation periods of the SNSM.

A shallower Moho would imply a thermal anomaly and higher heat fluxes than typical ones. This fact would have implications in the petroleum systems of the basins adjacent to the SNSM and could explain the presence of bituminous and anthracite carbons in the Cesar Ranchería basin.

Keywords: Sierra Nevada de Santa Marta, Cesar Ranchería basin, gravimetry, direct modeling.

INTRODUCCIÓN

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es uno de los relieves costeros más altos del mundo (5775msnm), este macizo triangular tiene lados de aproximadamente 200 km. Su posición aislada de los Andes del Norte, su geometría compleja y su composición variada (rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias desde el Mesoproterozoico hasta el Eoceno) la hace un elemento geológico único a nivel mundial.

Para explicar su evolución geológica se han propuesto distintos modelos, entre ellos Cediel et al. (2003) plantean un despegue a escala cortical intermedia (*detachment*) de fallas a lo largo de las cuales ocurren los levantamientos de la SNSM, la Serranía de Perijá (SP) y la Sierra de Mérida (SM); el de Montes et al., (2010), propone que la SNSM se levantó como consecuencia de rotación rígida debido a la colisión y cabalgamiento de la SNSM sobre la boyante placa del Caribe, generando la apertura la cuenca del César Ranchería, entre otros modelos. Sin embargo, las reconstrucciones existentes son muy esquemáticas y carecen de los datos en profundidad y análisis geofísicos complementarios que los validen y por este motivo, la evolución geológica de la Sierra Nevada y las implicaciones económicas asociadas a ella han sido causa de debate en las últimas décadas.

Con el motivo de aportar al conocimiento y comprensión de la evolución tectónica de la SNSM y a los conceptos exploratorios, se realiza el procesamiento e interpretación de datos aerogravimétricos (perfiles) con el fin de resolver en profundidad la estructura de este macizo, así como la relación de estas estructuras con la cuenca Cesar-Ranchería y los estilos de deformación que gobiernan en el área. Los perfiles corticales de la SNSM permiten interpretar la geometría y definir estructuras profundas relacionadas al Moho.

Inicialmente en el documento se presenta el marco geotectónico de la zona, se enumeran las principales hipótesis de evolución y luego se explica el procesamiento de los datos geológicos y geofísicos, los modelos geométricos corticales de la SNSM y el análisis de su anomalía y la anomalía observada. Por último, la interpretación del modelo obtenido en función de la evolución geológica regional.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los modelos geológicos son fundamentales para disminuir el riesgo geológico de la exploración de hidrocarburos, existen preguntas abiertas de evolución regional en las que es necesario trabajar, dado que sus respuestas ayudarían a soportar hipótesis de trabajo base para los modelos regionales de las cuencas sedimentarias. Se podría decir que sobre estos modelos recae el inicio y el fin de la exploración, pues sugieren las áreas prospectivas, el potencial de recursos que pueden contener, la planificación y valoración de los trabajos e inversiones necesarias para alcanzar una expectativa de recursos, y la cuantificación del riesgo geológico, expresado como la probabilidad de éxito del programa exploratorio, que los datos e interpretaciones manejadas involucran (Martínez del Olmo, 2009).

La evolución geológica de la SNSM y la cuenca Cesar Ranchería han sido causa de debate en las últimas décadas, así como las implicaciones económicas asociadas a esta última. Para explicar la evolución geológica de la SNSM se han propuesto distintos modelos, entre ellos Cediel et al. (2003) plantean un despegue a escala cortical intermedia (*detachment*) de fallas a lo largo de las cuales ocurren los levantamientos de la SNSM, la Serranía de Perijá (SP) y la Sierra de Mérida (SM); el de Montes et al. (2005) propone que la SNSM se levantó como consecuencia de rotación rígida causando la apertura la cuenca del César Ranchería y esta rotación fue probablemente causada por la colisión y cabalgamiento de la SNSM sobre la boyante placa del Caribe, entre otros modelos. Sin embargo, carecen de los datos en profundidad y análisis geofísicos que los validen.

Por otro lado, la SNSM presenta anomalías de bouguer altas (+200mGal) (Briceño et al., 2008), aun cuando se esperan anomalías negativas, toda vez que las montañas sufren procesos de compensación isostática, que permiten que exista una condición de equilibrio gravitacional en la corteza y el manto, es decir, equilibrio isostático. En general, las anomalías sobre zonas continentales son negativas, especialmente bajo orógenos y

positiva en las zonas de corteza oceánica dónde el espesor cortical es delgado (Lowrie, 2013).

Existen varios modelos de isostasia (Figura 1), el de Airy sugiere que, si existe una elevación (como un orógeno), debe existir una correspondiente raíz, es decir, un engrosamiento cortical y un Moho más profundo en consecuencia; como el material cortical es de menor densidad que el material del manto, existiría una fuerza de empuje que equilibre la fuerza de atracción gravitatoria de las montañas. Otro modelo es el de Pratt, el cual sugiere que la igualdad de presiones en profundidad se compensa mediante la variación de la densidad lateral de la capa superficial rígida; la expansión diferencial del material en columnas verticales da cuenta de la topografía, entonces cuanto más alta sea la columna por encima del nivel de base, menos densa será. Una compensación isostática regional, generaría una profundización del Moho (discontinuidad de Mohorovicic), zona de transición entre la corteza y el manto terrestre, de ahí su importancia (Watts, 2001).

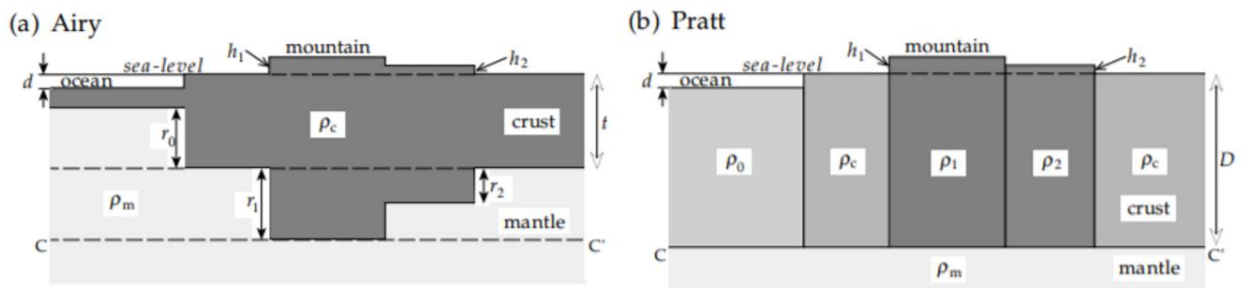


Figura 1. Compensación isostática a) según Airy b) según Pratt Tomada de (Lowrie, 2013)

Determinar la geometría del Moho es útil en la validación de perfiles geológicos, ya que se puede modelar la respuesta geofísica del Moho propuesto por un modelo y compararla con la medida geofísica real, lo que permitiría descartar o favorecer un modelo de evolución geológica. Además, tiene una expresión diferente en función del estilo estructural de la corteza que lo sobreyace.

Se espera que exista una estrecha relación entre el levantamiento de la SNSM y la evolución de la cuenca Cesar – Ranchería, dado que no se conoce en detalle cómo ocurrió el levantamiento, existen incógnitas de evolución sobre las cuencas que la rodean

(influencia del orógeno sobre las cuencas y temporalidades). Son preguntas relevantes para la geología económica, teniendo en cuenta que, estas cuencas, presentan un alto potencial de carbón y potencialmente de hidrocarburos gaseosos y no convencionales (García et al., 2007).

Con el motivo de aportar al conocimiento y comprensión de la evolución tectónica de la SNSM y a los conceptos exploratorios, se realiza el procesamiento e interpretación de datos gravimétricos con el fin de resolver en profundidad estructuras relacionadas al movimiento y levantamiento de este macizo, así como la relación de estas estructuras con la cuenca Cesar-Ranchería y los estilos de deformación que gobiernan el área.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Determinar la geometría del Moho bajo la Sierra Nevada de Santa Marta a partir de información geológica y geofísica y sus implicaciones en la evolución geológica regional.

1.2.2 Objetivos Específicos

Preparar los datos geofísicos y geológicos del estudio.

Construir un modelo geométrico cortical de la SNSM a partir de información geológica secundaria.

Generar un modelamiento directo a partir de los datos de aerogravimetría.

Interpretar los resultados del modelo obtenido en función de la evolución geológica regional de la Sierra Nevada de Santa Marta.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1. ANTECEDENTES (MARCO GEOTECTÓNICO)

La Sierra Nevada de Santa Marta sobresale en el noroccidente de Colombia como un cuerpo montañoso triangular, rodeado por fallas geológicas regionales: la Falla de Oca-El

Pilar y la Falla Santa Marta – Bucaramanga, las cuales han sido descritas como fallas de rumbo. Es la montaña más alta de Colombia (5800 msnm) y está aislada de Los Andes (Figura 8).

Según Tschanz et al. (1974) la SNSM puede ser dividida en diferentes regiones y provincias. Las regiones noroeste y sureste están separadas por el lineamiento de Sevilla, el cual pudo ser un límite de placas desde el Pérmico hasta el Eoceno que controló el emplazamiento de magmas y a lo largo del cual se desarrolló la faja metamórfica de Sevilla. Y las tres provincias son: Santa Marta, Sevilla y Sierra Nevada (Figura 2). La provincia de la Sierra Nevada es la más antigua, su basamento se compone de gneises, granulitas y anfibolitas precámbricas, intruidas en eventos magmáticos durante el Mesozoico. La provincia de Sevilla, ubicada al noroeste de la anterior provincia, es esencialmente un cinturón polimetamórfico compuesto de gneises y esquistos, intruido por rocas plutónicas que datan del Pérmico, Mesozoico y Cenozoico. La provincia de Santa Marta corresponde a la esquina septentrional de la Sierra Nevada de Santa Marta, está compuesta por dos cinturones metamórficos con tendencia noreste de esquistos y anfibolitas separados por el Batolito de Santa Marta. Los eventos metamórficos han registrado edades del Mesozoico mientras que los emplazamientos plutónicos tienen edades del Cenozoico Inferior a Medio.

Los eventos metamórficos de la SNSM son principalmente 3: en el Precámbrico la orogenia de Grenville deja como evidencia la Granulita de Los Mangos, luego en el Paleozoico la orogenia de Sevilla genera el Gneis de Buritaca y las rocas metamórficas no diferenciadas, y por último en Cretácico y Paleoceno (?) ocurriría la orogenia de Santa Marta que produjo el metamorfismo de los Esquistos de Santa Marta (Cardona et al., 2010; Colmenares et al., 2007; Tschanz et al., 1974). Las rocas metamórficas de la orogenia de Grenville se encuentran en la provincia de la Sierra Nevada de la cual hace parte la cuenca Cesar Ranchería, estas rocas y las series de Perijá corresponden al basamento metamórfico de la cuenca.

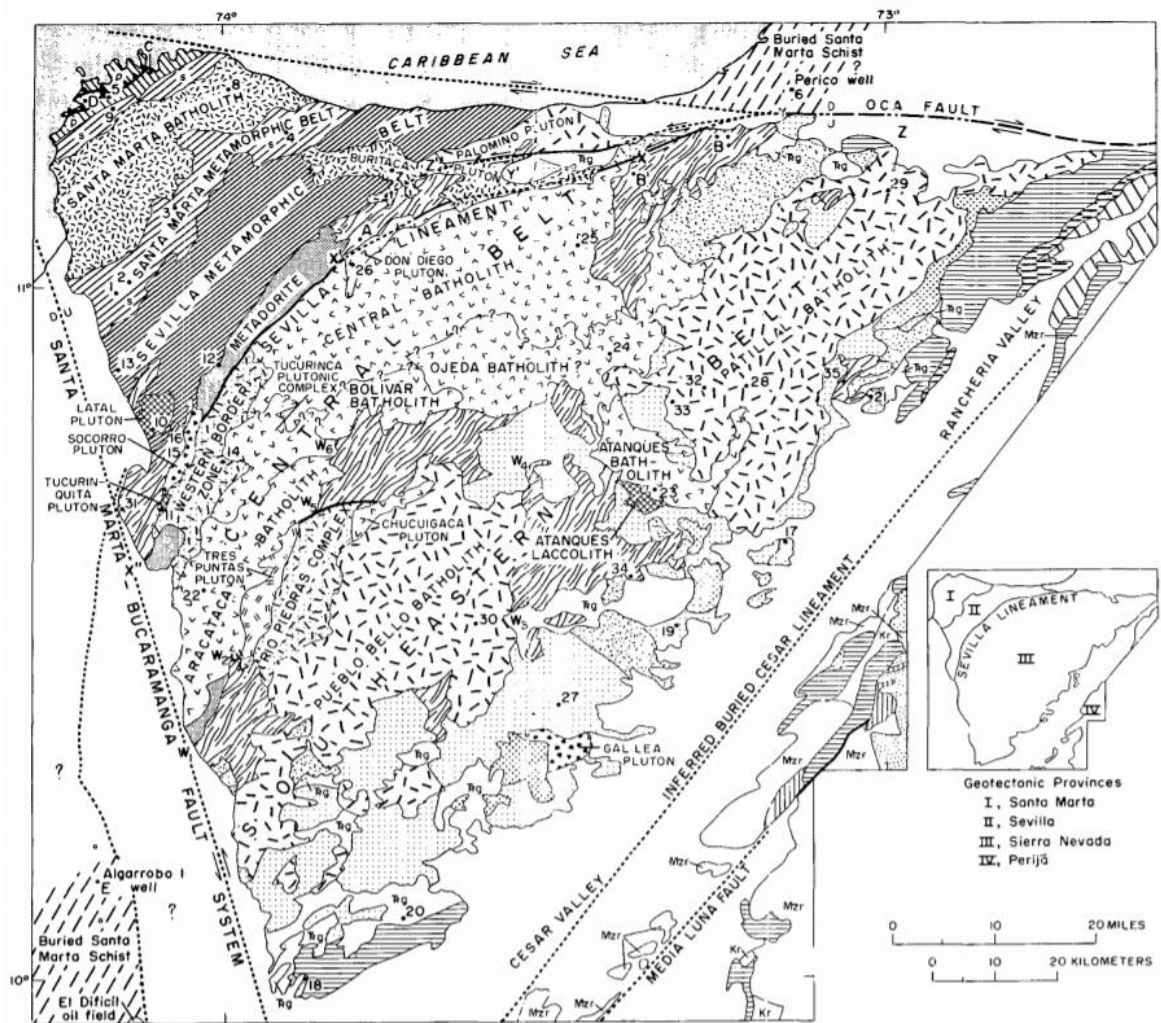


Figura 2. Mapa geológico propuesto por Tschanz et al. (1974) para la SNSM. Se observan las tres provincias geotectónicas propuestas y sus límites.

Como se observa en la Figura 2 la provincia de la Sierra Nevada y la de Sevilla están separadas por el lineamiento de Sevilla. Las provincias de Sevilla y Santa Marta no tienen un límite fallado. Las fallas regionales en el límite norte y suroeste son la falla Oca-EI Pilar y la falla Santa Marta – Bucaramanga. Además, en la cuenca Cesar Ranchería hay un lineamiento inferido que Tschanz et al. (1974) denomina lineamiento de Cesar.

Los procesos tectónicos causantes del levantamiento de la SNSM son objeto de discusión en la actualidad y también las implicaciones económicas de estos eventos en las cuencas sedimentarias del sector. A pesar de que existen distintos modelos para explicar la evolución geológica de la SNSM, entre ellos los propuestos por Cediell et al. (2003) y

Montes et al. (2010), la ausencia de interpretaciones de datos en profundidad dificulta tener criterio para elegir alguno de ellos.

Para Cediel et al. (2003) la SNSM es parte del bloque de la subcuenca de Maracaibo, el cual, es una unidad tectónica que se ha comportado como una subplaca. Esta unidad incluye los Andes de Mérida, el Cinturón de Santander-Perijá y la SNSM. Un corte NW-SE a lo largo del bloque Maracaibo, presentado por Cediel et al., (2003) sugiere que las fallas a lo largo de las cuales ocurren los levantamientos de la SNSM, SP y Sierra de Mérida (SM), están conectados en profundidad por un despegue a escala cortical intermedia (*detachment*) como se ve en la Figura 3, sin embargo, aclara que no hay evidencias para soportarla.

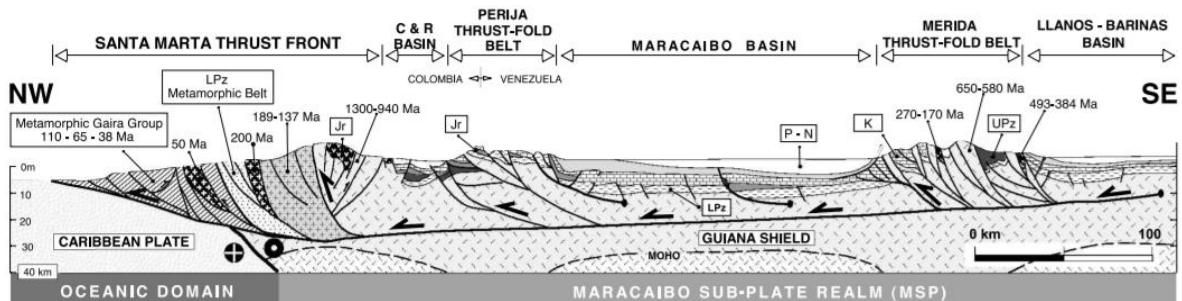


Figura 3. Modelo de Cediel et al., (2003). C&R Basin = Cuenca Cesar Ranchería; UPz = Paleozoico Superior; LPz = Paleozoico Inferior; Jr = Jurásico; K = Cretácico; P = Paleogeno; N = Neogeno.

El modelo propuesto por Montes et al. (2005) y Montes et al. (2010) se basa en observaciones estratigráficas y estructurales con las que propone que el levantamiento de la SNSM ocurrió gracias a una rotación rígida, producto de la colisión y cabalgamiento de la SNSM sobre la boyante placa Caribe y que permitió la apertura de la cuenca Cesar Ranchería. En la Figura 4 se puede ver el modelo conceptual de pivote que permitiría el levantamiento sobre la placa del Caribe, un basculamiento al este y un Moho más somero bajo la SMSN. Según los autores, la anomalía de Bouguer alta sobre la SNSM sugiere un Moho somero que indicaría que el macizo es un bloque de corteza aislado y alóctono.

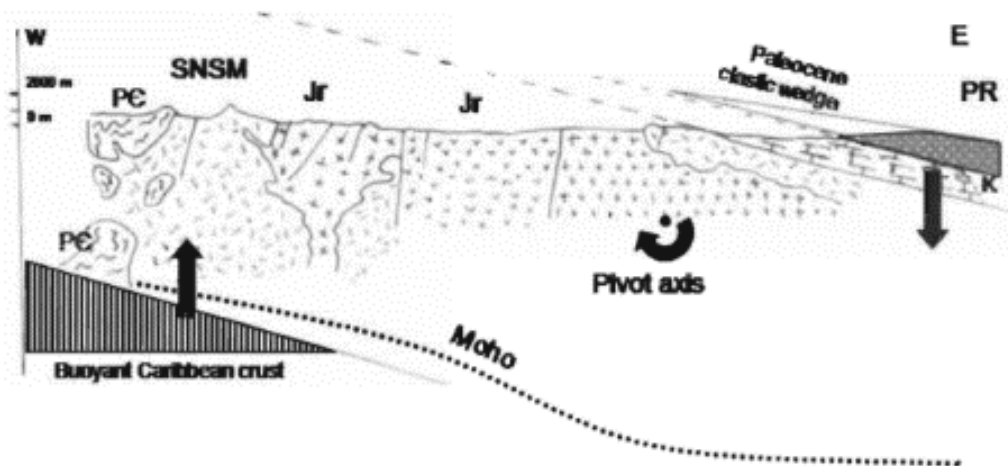


Figura 4. Modelo conceptual de pivote de Montes et al. (2005). SNSM=Sierra Nevada de Santa Marta, PR=Serranía de Perijá, Jr=Jurásico, PE=Paleógeno

En Montes et al. (2010) hay dos propuestas a partir del modelo de rotación que indicarían la extensión de las cuencas sedimentarias y el desplazamiento de las fallas principales. La Figura 5 ilustra el posible modelo de rotación y emplazamiento de la SNSM según Montes et al. (2010) en b y c se observan los resultados del modelamiento que obtuvieron con una rotación de 23° y 30° respectivamente, lo anterior, sin mover el norte de la Cordillera Central y el bloque Maracaibo y considerando que la SNSM está totalmente separada de la cuenca Cesar-Ranchería.

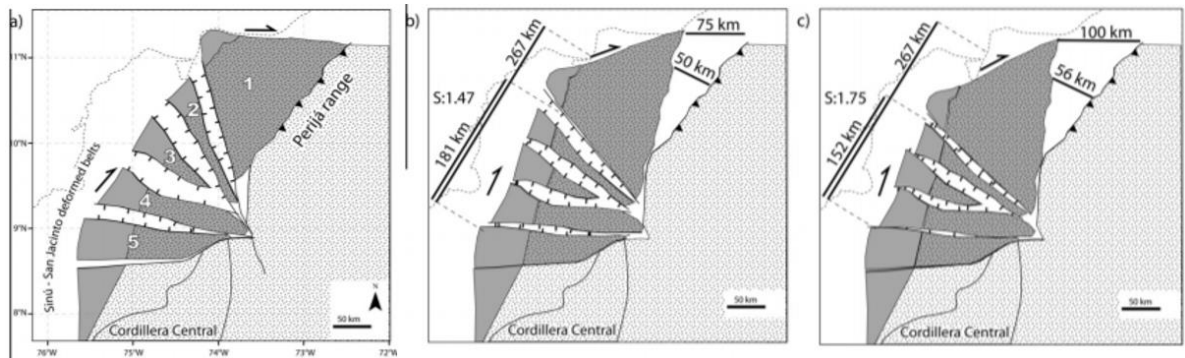


Figura 5. Modelo de Montes et al. (2010). a) configuración actual b) 23° de rotación c) 30° de rotación. El área 1 es la SNSM y del 1 al 5 son áreas definidas según indicativos de graben realizados en el estudio.

En un estudio regional Hurtado Briceno & Leuro Parra (2000) realizaron un modelo gravimétrico del espesor de la corteza terrestre en Colombia, en el que concluyen que la región caribe está influenciada en su mayor parte por la Sierra Nevada de Santa Marta donde observaron la mayor descompensación isostática del país ya que la antirraíz de

45km que obtuvieron no es suficiente para compensar una elevación montañosa de 5700 m. Es un estudio con resolución aproximada de 2km y no propone modelos alternativos para explicar esta anomalía gravimétrica de la SNSM.

Adicionalmente, Sanchez & Mann (2014) realizaron un modelamiento 2D regional que incluye la SNSM, la cuenca Cesar Ranchería, la Serranía del Perijá y la cuenca de Maracaibo. También incluyen otros modelamientos 2D de la cuenca Cesar Ranchería. Como se ve en la Figura 6 proponen un ángulo de subducción de la placa Caribe entre 10° y 15° y un espesor entre 6 y 7 km, un basamento para la cuenca Cesar Ranchería a 10 – 12km de profundidad y bajo la SNSM un engrosamiento cortical con un Moho a 50km lo que implicaría conceptualmente la existencia de una raíz cortical generada por compensación isostática (modelo de Airy), lo cual no es compatible con los valores gravimétricos observados sobre este macizo.

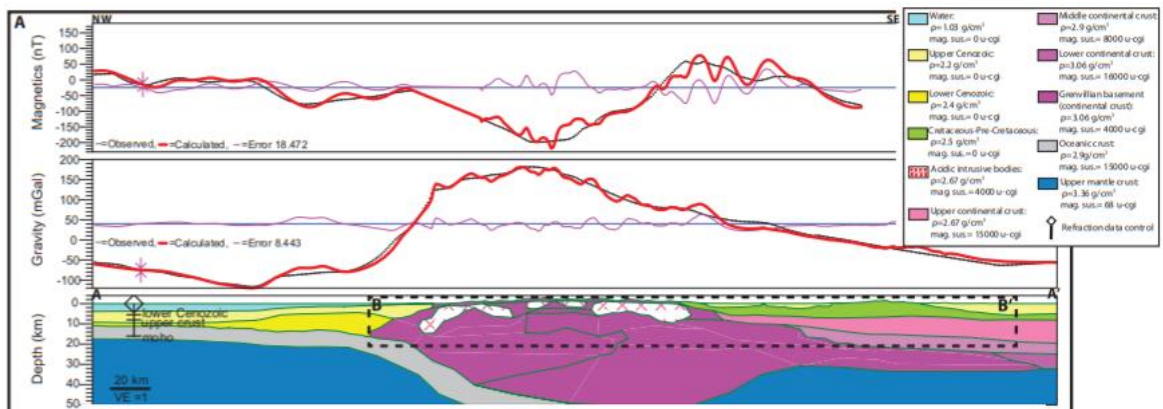


Figura 6. Modelo regional realizado por Sanchez & Mann (2014) para inferir la estructura cortical bajo la SNSM y la cuenca Cesar Ranchería

El análisis de las hipótesis propuestas hasta ahora para la SNSM y las cuencas sedimentarias muestra que es necesario contar con más información y con el procesamiento de datos de la geología más profunda, que permitan sustentar un modelo de manera robusta y que permita ofrecer una alternativa que sea al mismo tiempo consistente con la observación de la ausencia de compensación isostática evidente por la anomalía gravimétrica y tectónicamente aceptable para el marco geológico regional.

Villagómez et al. (2011) realizaron análisis de trazas de fisión en apatitos para investigar la historia térmica de las rocas de la SNSM y sus períodos de exhumación. Tomaron 14 muestras en granitoides jurásicos y gneises precámbricos en la provincia de la Sierra Nevada; una muestra de la granodiorita de Buritaca del Paleogeno y otra de un granito sin datar en la provincia de Sevilla; 22 muestras de granitoides del Paleoceno-Eoceno del Batolito de Santa Marta y esquistos de Santa Marta del Cretácico Superior en la provincia de Santa Marta.

Los resultados (Figura 7) sugieren que el sur de la provincia de la Sierra Nevada se exhumó a tasas elevadas entre 65-40 Ma, con un pulso más reciente entre 40-25 Ma que ocurrió próxima a la falla Santa Marta – Bucaramanga. La zona noroccidental de esta provincia, cerca al lineamiento de Sevilla, se exhumó más rápidamente entre 29-26 Ma. La provincia de Santa Marta se exhumó entre 30-25 Ma y 25-16Ma sin una correlación clara entre la localización y el tiempo de exhumación. El patrón general muestra pulsos de exhumación más recientes al noroeste, combinado con fallas inversas con esta misma dirección de vergencia, lo que sugiere una propagación en dirección noroeste responsable de la exhumación durante el Cenozoico.

La provincia de la Sierra Nevada se exhumó primero y para este momento los sedimentos de la cuenca Cesar Ranchería corresponden a las formaciones Hato Nuevo, Manantial, Cerrejón y Barco-Cuervos de ambientes continentales, sin embargo la depositación predominante anterior a estas (Cretácico Superior) corresponde a ambientes marinos en los que se depositó la Formación La Luna y Formación Molino (representan el máximo nivel de transgresión). Además, el análisis de procedencia de los sedimentos del Paleoceno de la cuenca indican que la principal fuente aportante fue la SNSM (Bayona et al., 2009; Colmenares et al., 2007). La exhumación de las rocas de la SNSM también podría relacionarse con la somerización de la cuenca Cesar Ranchería y por lo tanto este cambio de facies depositacionales marinas a continentales.

Las exhumaciones posteriores al Paleoceno corresponden a las otras provincias de la SNSM, con una relación menor a la cuenca Cesar Ranchería. Las rocas sedimentarias de la cuenca a partir del Paleoceno son principalmente continentales, excepto el Conjunto Calcáreo de la Guajira en la subcuenca Ranchería que se deposita en un ambiente marino somero. La relación entre estos eventos de exhumación y sedimentación

sugerirían una evolución geológica común para ambos elementos, SNSM y cuenca Cesar Ranchería, que se considerarían como parte de un mismo elemento tectónico, la subplaca de Maracaibo.

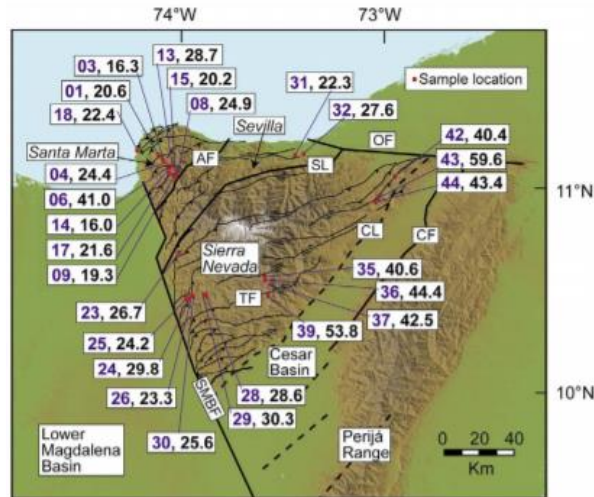


Figura 7. Datos de tiempo de exhumación con trazas en apatitos. Tomada de Villagómez et al. (2011)

El modelo de evolución regional tiene implicaciones en las cuencas sedimentarias alrededor de la SNSM, es de esperarse que el levantamiento de este orógeno haya tenido influencia en estas cuencas, las cuales son áreas de gran interés económico por su alto potencial de hidrocarburos y carbón. El mejoramiento del modelo geológico para la exploración disminuye el riesgo geológico que está asociado al riesgo financiero de la exploración en geología económica, la cual involucra altas inversiones.

1.3.2. Cuenca Cesar Ranchería

La cuenca Cesar Ranchería está localizada en el noreste de Colombia, entre la SNSM y la Serranía de Perijá, cubre un área de 11.630 km². La falla Oca-El Pilar al norte es el límite con la cuenca de la Baja Guajira y la falla Santa Marta - Bucaramanga al occidente es el límite con la cuenca Plato (Figura 8) (García et al., 2007).

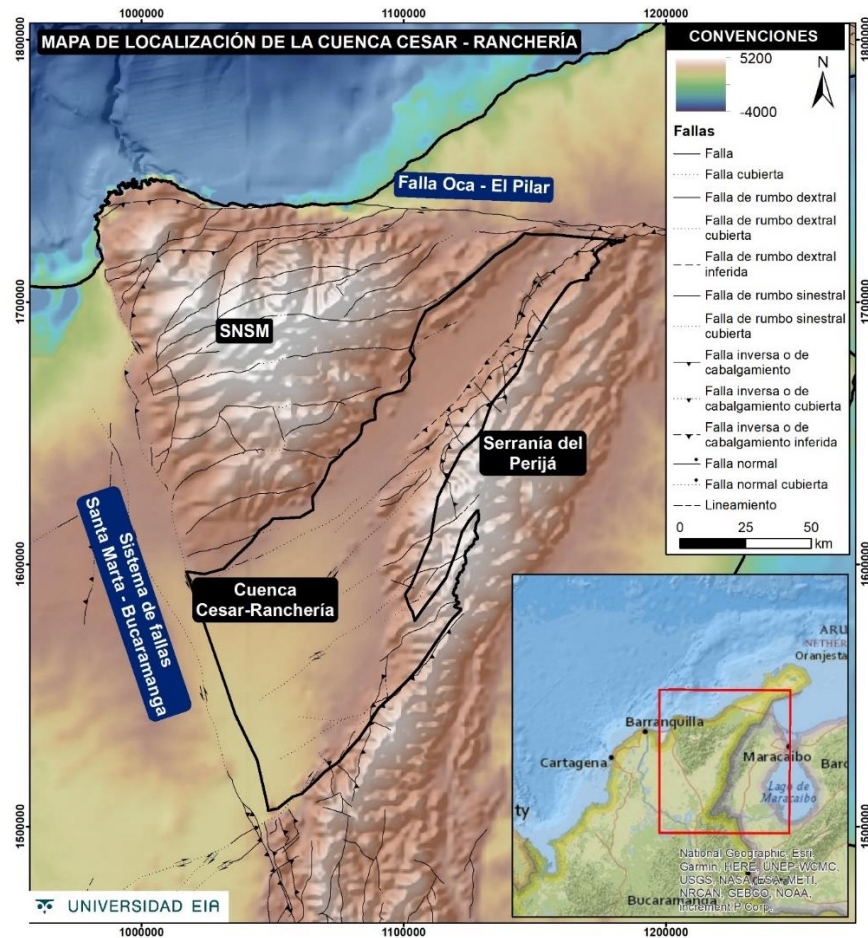


Figura 8. Localización de la cuenca Cesar Ranchería. La imagen de fondo es un modelo de elevación digital de Topex (University of California, 2019) y las fallas y su simbología son del mapa geológico de Colombia (Gómez Tapias et al., 2015).

La cuenca está dividida en dos por el Alto de Verdesia: la subcuenca Cesar y la subcuenca Ranchería. La parte más amplia hacia el suroccidente corresponde a la subcuenca del Cesar, donde el basamento está a 6-7km de profundidad y la parte más

angosta hacia el nororiente corresponde a la subcuenca del Ranchería, dónde el basamento está a una profundidad entre 2 y 3km (Sanchez-Rojas & Palma, 2014).

1.3.2.1. Estratigrafía cuenca Cesar Ranchería

Las unidades de roca presentes en la cuenca Cesar Ranchería abarcan desde el Precámbrico hasta depósitos recientes, se describen a continuación tomando como referencia la columna generalizada de García et al. (2007) para la subcuenca Cesar y Ranchería como se ve en la Figura 9.

		CUENCA DEL RANCHERIA	CUENCA DEL CESAR
CENOZOICO	CUATERNARIO	ALUVIONES - TERRAZAS	ALUVIONES - TERRAZAS
	TERCIARIO	PLIOCENO	CUESTA
		MIOCENO	
		OLIGOCENO	
		EOCENO	CUERVOS BARCO
		PALEOCENO	
	CRETACICO	SUPERIOR	MOLINO LA LUNA
		INFERIOR	GP COGOLLO
			AGUAS BLANCAS
			MARACAS TOCUY ANIMAS
MESOZOICO	TRIASICO JURASICO	LA QUINTA	LAGUNITAS
			RIO NEGRO
	PERMICO	MANAURE	GRUPO CACHIRI
	CARBONIFERO	GRUPO CACHIRI	
	DEVONICO	PERIJA	
	ORDOVICIO	PERIJA	
PALEOZOIC	CAMBRICO	GRANULITA DE LOS MANGOS	
	PRECAMBRICO		

Figura 9. Estratigrafía de las subcuencas Cesar y Ranchería. Tomado de (García et al., 2007)

El basamento tectónico de la cuenca se compone de rocas metamórficas descritas por Tschanz et al. (1974), tales como, Granulita de Los Mangos y Series de Perijá. La

Granulita de los Mangos está conformada principalmente por gneises granulíticos precámbricos (facies anfibolita alta a granulita baja) correspondientes a la sutura de la orogenia de Grenville, es el basamento de la subcuenca Ranchería. Las Series de Perijá son rocas paleozoicas de metamorfismo de baja presión y/o baja presión y alta temperatura como: filitas, esquistos cloríticos y sericíticos, cuarcitas y filitas cuarzosas, son basamento de ambas subcuencas.

La depositación del Paleozoico al reciente en ambas subcuencas está representada por una gruesa columna sedimentaria. El Grupo Rio Cachirí (Devónico) y la Formación Manaure (Pérmico) son las más antiguas, corresponden a conglomerados basales, areniscas y rocas clásticas calcáreas depositadas en un ambiente marino transgresivo (García et al., 2007).

Las rocas del Triásico y Jurásico para la subcuenca Ranchería corresponden a depósitos clásticos no marinos, areniscas, limolitas y conglomerados color rojo denominada Formación La Quinta, la cual reposa discordante sobre las rocas Paleozoicas y es suprayacida discordantemente por rocas Cretácicas. Esta formación se formó dentro de un marco tectónico extensional continental, caracterizado por estructuras de graben y horst (Flett Rollins, 1960).

Durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano se presenta un periodo de no depositación en la subcuenca Cesar. Luego se deposita la Formación Río Negro, de edad Barremiano Aptiano, con predominio de ambientes continentales fluviales de corrientes trenzadas en su base que cambia gradualmente a ambientes de estuario hacia su parte media y superior. Está compuesta por areniscas y conglomerados de ambientes continentales a marinos someros, la cual es suprayacida por una gruesa sucesión de calizas, lutitas carbonosas y en menor proporción areniscas, correspondientes al Grupo Cogollo que incluye las formaciones Lagunitas, Aguas Blancas y La Luna, la sedimentación marina se tornó dominante. La Formación Aguas Blancas en la subcuenca del Ranchería está conformada por calizas, mientras que, en la subcuenca del Cesar, se diferencian tres miembros de base a techo: Miembro Ánimas, Tocuy y Maracas, conformados por shales carbonosos, areniscas y calizas lumaquéllicas respectivamente (García et al., 2007).

En el Cretácico Superior se depositó la Formación La Luna en ambas subcuencas, una secuencia alternante de limolitas, arcillolitas, lutitas negras carbonosas y calcáreas, calizas bituminosas, capas de chert, concreciones y nódulos de diversos tamaños. El ambiente depositacional para esta formación es marino y corresponde con el máximo nivel de transgresión. Luego de la depositación de La Luna se presenta un periodo de no-depositación, definido por una inconformidad existente entre la Formación La Luna y las rocas suprayacentes. Después se deposita la Formación Molino en ambas subcuencas, que consiste en shales carbonáceos finamente laminados y arcillolitas verdes oscuras (García et al., 2007).

A partir de este momento se presentan características estratigráficas diferentes en cada una de las subcuencas Cesar y Ranchería.

En la subcuenca del Ranchería se depositan en el Paleoceno las formaciones Hato Nuevo, Manantial y Cerrejón que consisten en depósitos detríticos intercalados con sedimentos finos, como las calizas lumaquéllicas, areniscas arcillosas, lutitas y carbón. Mientras tanto en la subcuenca Cesar se deposita la unidad Barco-Cuevos, consiste en una secuencia de lutitas carbonosas, limolitas, areniscas y mantos de carbón que se depositaron en un ambiente deltáico (García et al., 2007).

En el Paleoceno Superior - Eoceno se deposita la Formación Tabaco en la subcuenca Ranchería, constituida por un conjunto de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, intercaladas con niveles de conglomerados y delgados niveles de arcillolitas grises, azules y blancas. El ambiente de depositacional es fluvial de corrientes acordonadas (García et al., 2007).

También en la subcuenca Ranchería, en el Eoceno superior – Oligoceno se deposita el Conjunto Calcáreo de la Guajira que consiste en un conglomerado basal polimíctico, con fragmentos de rocas ígneas y sedimentarias como calizas y chert, la parte superior está conformada por calizas micríticas glauconíticas e intercalaciones de arcillas y areniscas. Los contactos inferior y superior son discordantes. El Conjunto Conglomerático del Mioceno superior está compuesto por conglomerados con clastos de rocas ígneas, chert negro, cuarzo y calizas, en matriz arcillo-limosa y ocasionales intercalaciones arcillosas (Cáceres, Molina, & Bernal, 1981).

En la subcuenca Cesar, en el Mioceno Medio a Plioceno se depositó la Formación Cuesta, constituida por areniscas poco consolidadas, mal seleccionadas, con algunas intercalaciones de conglomerados, limolitas y arcillolitas de un ambiente netamente continental, el contacto suprayacente es discordante y a su vez está cubierta discordantemente por depósitos recientes (García et al., 2007).

Los depósitos recientes corresponden a abanicos aluviales y depósitos aluviales, que presentan un desarrollo asociado con las cuencas hidrográficas de los ríos Cesar y Ranchería, así como el piedemonte de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de Perijá.

1.4. MARCO TEÓRICO

1.4.1. Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos son una herramienta indispensable para la detección de cuerpos y estructuras en el subsuelo, su identificación se realiza a través de mediciones indirectas de alguna propiedad física de las rocas, mediciones que son posteriormente sometidas a diversos procesos matemáticos con el fin de obtener un modelo de la distribución en el subsuelo de la propiedad física estudiada (Del Bosque Espinosa & Hidalgo Moral, 2014).

Existen diversos métodos geofísicos, y la elección del método adecuado depende del objetivo que se persiga, el alcance del estudio y el detalle que se quiera obtener; para este estudio se emplea la gravimetría.

Gravimetría

La gravimetría es un método geofísico que consiste en la medición de la aceleración de la gravedad sobre el terreno, con el fin de detectar las variaciones de densidades y profundidades en las unidades geológicas presentes en el subsuelo. Estas variaciones generan una anomalía en los valores de aceleración medidos y mediante el procesamiento de estos datos se pueden obtener mapas de cuerpos más o menos densos que el medio (intrusivos, domos de sal, carbón, entre otros), mapas estructurales regionales, geometría de estructuras, etc (Lowrie, 2013).

El principio físico en el cual está basado el método gravimétrico es la Ley Universal de la Gravitación de Newton, en donde la fuerza gravitacional entre dos partículas con masas m_1 y m_2 separadas una distancia r , se representa por la Ecuación 1, donde G es la constante universal de gravitación.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Ecuación 1. Ley de la gravitación universal

Como se observa en la Ecuación 1, la fuerza gravitacional disminuye con el cuadrado de la distancia, esto quiere decir que un cuerpo más profundo ejercería una fuerza menor que el mismo cuerpo más somero. Además, la fuerza es directamente proporcional a las masas, lo que quiere decir que, si hay más masa en el mismo volumen, es decir, un cuerpo de mayor densidad también será mayor la fuerza gravitacional ejercida por este.

La aceleración sobre una masa m se representa con la Ecuación 2. Si la Tierra fuera esférica y homogénea el valor de la gravedad sería igual en toda su superficie, pero debido al achatamiento por su rotación, la fuerza centrífuga (ficticia) y a la distribución de materiales de distintas densidades, se evidencian valores diferentes de la gravedad en la tierra.

$$g = G \frac{m_T}{r^2}$$

Ecuación 2. Aceleración gravitacional

Estas variaciones en la gravedad se denominan anomalías gravimétricas, se puede ver en la Figura 10 donde las anomalías negativas están en azul y las positivas en rojo.

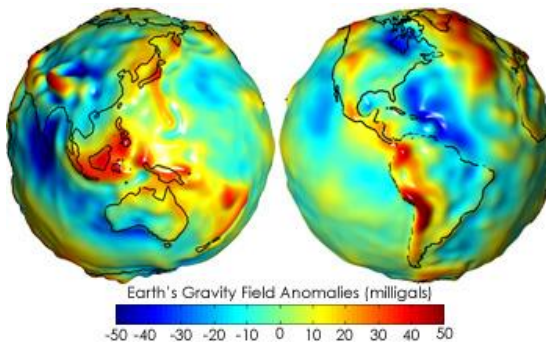


Figura 10. Anomalía gravimétrica de la Tierra, satélite Grace (NASA, 2004)

En gravimetría es necesaria la existencia de una diferencia de densidades entre el cuerpo que se quiere mapear y lo que lo rodea o un desplazamiento relativo entre los cuerpos. De no existir el contraste o desplazamiento no funciona el método porque no existiría anomalía gravimétrica. A partir de las variaciones del campo gravitacional es que se pueden identificar y modelar los cuerpos, estructuras o contactos (Telford et al., 1990).

1.4.2. Procesamiento de datos gravimétricos

El valor de la gravedad teórica para la superficie de la Tierra puede ser calculado a partir de la latitud, la excentricidad y la velocidad angular de la Tierra; la resta entre este valor y el valor real observado (medido) es lo que se denomina anomalía gravimétrica. No obstante, los datos de aceleración de la gravedad deben corregirse con el fin de separar la aceleración causada por la heterogeneidad de la corteza de las demás componentes de la aceleración asociadas a otras fuentes (Telford et al., 1990).

Se debe corregir la diferencia de elevación de los puntos medidos sobre un datum de referencia, a esta corrección se le denomina aire libre. Cada metro por encima del nivel del mar hace que el valor de la gravedad disminuya en 0.3086mGal. Si el punto de medición se encuentra por encima del nivel del mar la corrección se suma, pues la posición está más alejada del centro de la Tierra y si está por debajo se resta, pues está más cerca al centro de la Tierra.

Luego se debe realizar la corrección de Bouguer, que tiene en cuenta, además, las masas presentes en el punto de observación y la superficie de referencia (geoide). Para ello es necesario utilizar un valor de densidad de la masa objetivo, usualmente se utiliza 2.67

g/cm^3 (promedio para las rocas en la corteza) y con esto se calcula su efecto sobre el valor de la gravedad local (Telford et al., 1990).

Si los datos son tomados por vía terrestre, otra corrección se debe realizar considerando el efecto de atracción de masa lateral dada por la topografía (valles y montañas) alrededor de una estación o punto de medición, tanto las situadas por encima como las depresiones situadas por debajo (Telford et al., 1990).

Si es una adquisición aérea, dado que el instrumento de medición está en movimiento es necesaria la corrección de Eötvös, que es la suma de los componentes verticales de las aceleraciones producidas por el efecto Coriolis y la aceleración centrífuga causada por el movimiento del gravímetro. Si la velocidad es al Este, va en el mismo sentido que la rotación de la Tierra por lo que hay una aceleración centrífuga extra que actúa hacia arriba, es decir, opuesta a la gravedad y por lo tanto disminuye la medida del gravímetro, la corrección debe sumar. Si la velocidad es al oeste, la aceleración centrífuga aumenta el valor medido por el gravímetro y se debe restar este efecto.

La Figura 11 sintetiza las correcciones que se realizan a las mediciones de la gravedad para hacer los análisis de anomalías. P es una medida a la izquierda y debajo de Q, en resumen: la corrección por terreno tiene en cuenta que hay más masa arriba de la medición en P debido a la topografía y menos masa a la izquierda y debajo de Q, la corrección de Bouguer elimina o adiciona el efecto de las masas sobrantes o faltantes respecto a un nivel de referencia y la corrección de aire libre desplaza los puntos de medición hasta ubicarlos sobre un mismo nivel de referencia que usualmente es un elipsoide de referencia, es decir, altura sobre el nivel del mar cero. Las correcciones se realizan para que las mediciones en varios puntos sean comparables, eliminando los efectos locales que se deben a la topografía.

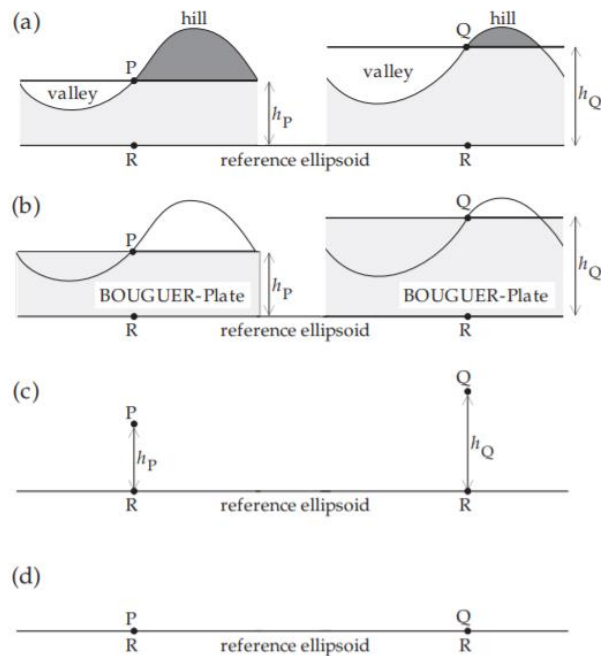


Figura 11. Correcciones a los datos a) de terreno b) Bouguer c) Free Air d) resultado. Luego de las correcciones, las aceleraciones medidas en las estaciones P y Q pueden compararse con el valor teórico de la gravedad en el elipsoide de referencia. (Telford et al., 1990)

Al obtener la anomalía de Bouguer se realizan procesamientos dependiendo del objetivo del estudio para facilitar la interpretación geológica al transformar los datos en otra nueva forma, en general, estas transformaciones no definen la distribución de las fuentes, pero revelan información que puede ser útil para el entendimiento de su naturaleza.

Como el campo de gravedad es un campo potencial, puede ser continuo a diferentes niveles y es posible proyectar la anomalía de Bouguer para obtener la anomalía de la fuente regional o residual. Esta transformación se llama continuación analítica y es una proyección matemática del campo potencial de un datum a otro, puede ser superior o inferior. Una continuación analítica hacia arriba (a un datum superior) resalta las anomalías causadas por fuentes profundas (las anomalías de fuentes superficiales se minimizan), es decir, se filtran las longitudes de onda corta. También es usada para comparar o unir datos adquiridos a diferentes alturas (Blakely, 1996).

Otra transformación utilizada son las derivadas espaciales, también conocidas como atributos gravimétricos y de mucha utilidad para interpretación de límites litológicos y estructuras. Las derivadas funcionan como filtros que permiten identificar la configuración

de las fuentes al realzar los componentes de onda cortos o largos y los cambios en el campo de gravedad. En general, la primera derivada vertical se usa para identificar las anomalías de cuerpos someros, mientras que la primera derivada horizontal permite identificar los bordes de las fuentes. En las verticales se usan la primera y segunda derivada, en las horizontales, generalmente, solo la primera derivada (Hinze et al., 2013).

Según Hinze et al. (2013) la primera derivada físicamente equivale a medir simultáneamente el campo en dos puntos a diferentes alturas sobre la misma vertical y después obtener la diferencia de los datos obtenidos y dividir el resultado entre la separación vertical de los puntos de medición (ver Ecuación 3). Este cálculo elimina las longitudes onda larga, los efectos regionales y ayuda a separar los efectos de las anomalías adyacentes, asociadas a rocas cercanas a la superficie.

$$\frac{\partial G}{\partial z} = \frac{G_{z+\Delta z} - G_z}{\Delta z}$$

Ecuación 3. Derivada vertical

La segunda derivada vertical cumple una función muy similar a los filtros pasa altos, ya que enfatiza las expresiones de características locales y remueve el efecto de anomalías regionales. La principal ventaja de este método consiste en que el valor cero, sigue de manera muy precisa a los bordes subverticales de bloques intrabasamentales, o a los bordes de perturbaciones o fallas suprabasamentales (Hinze et al., 2013).

Un método complementario a la primera derivada vertical es la derivada horizontal total (DHT), normalmente produce una ubicación más exacta de las fallas que la primera derivada vertical (ver Ecuación 4). Los máximos en la zona mapeada indican los bordes de las fuentes. También se pueden generar derivadas horizontales direccionales específicas para resaltar rasgos de rumbo conocido (Hinze et al., 2013).

$$DHT = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}$$

Ecuación 4. Derivada horizontal total

Otra transformación es la señal analítica, que usa las derivadas espaciales en x, y, y z como se ve en la Ecuación 5, para lograr máximos sobre cuerpos discretos o sobre sus

bordes. Genera máximos tanto para un depocentro sedimentario, cuerpo anómalamente poco denso, como para un cuerpo anómalamente denso. El ancho del máximo es un indicador de la profundidad del contacto, siempre que la señal provenga de un contacto único y no una mezcla.

$$|A(x,y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)^2}$$

Ecuación 5. Señal analítica

La derivada generalizada es un atributo similar a la señal analítica, pero proyecta la amplitud a lo largo de una dirección determinada definida por un azimuth (θ) y buzamiento (ϕ) (Ecuación 6). Se usa para resaltar los rasgos en una dirección específica.

$$GD = \frac{\left(\frac{\partial G}{\partial x} \sin \theta + \frac{\partial G}{\partial y} \cos \theta\right) \cos \phi + \left(\frac{\partial G}{\partial z}\right) \sin \phi}{\sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)^2}}$$

Ecuación 6. Derivada generalizada

Cuando el buzamiento es 0° la derivada tiene la mayor sensibilidad en el azimuth asignado, si es 90° es equivalente a la señal analítica, es decir, sin un azimuth preferencial.

La derivada tilt es la relación de la derivada vertical respecto al valor absoluto de la derivada horizontal del campo como se ve en la Ecuación 7. Es una relación adimensional que responde igual a fuentes someras o profundas y a un rango dinámico de amplitudes para fuentes del mismo nivel. El ángulo tilt es positivo sobre la fuente, cero en los bordes o cerca de ellos y negativo por fuera (Cooper & Cowan, 2006).

$$Tilt = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial G}{\partial x}}{\sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}} \right)$$

Ecuación 7. Derivada tilt

1.4.3. Construcción del modelo

La interpretación cuantitativa de datos gravimétricos puede realizarse mediante la modelización 2D. Para decidir la escala (local o de detalle, o bien regional) hay que tener en cuenta que la extensión de los cuerpos geológicos que se puede delimitar con la modelización dependerá del espaciado de los datos y de la longitud del perfil. La teoría de muestreo indica que el ancho de los cuerpos geológicos que se pretende modelar no puede ser menor que el doble de la distancia media entre estaciones (Ayala & Rey, 2009).

El modelado directo implica la construcción de un modelo geológico hipotético y el cálculo de la respuesta geofísica de ese modelo. Para ello se asume que la corteza terrestre se puede representar como una superposición de un conjunto de capas con densidades distintas tal como se ilustra en la

Figura 12.

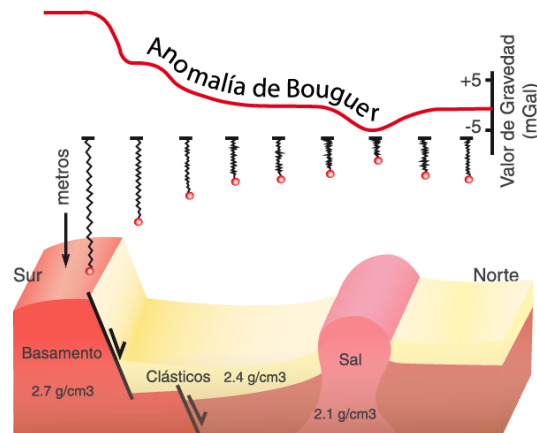


Figura 12. Modelo geológico y su respuesta gravimétrica (Geofísica Argentina, 2015)

Para un modelo geológico se puede obtener una anomalía de Bouguer, que dependerá de la densidad de los cuerpos, su profundidad y geometría. En la corteza la densidad de las rocas varía entre 1.6 g/cm^3 y 3.2 g/cm^3 , este valor depende de su composición mineralógica y la porosidad. La variación en la porosidad de las rocas sedimentarias

causa una variación en su densidad; en las secuencias sedimentarias la densidad tiende a aumentar con la profundidad, debido a la compactación y a la cementación que ocurre progresivamente en el tiempo. Por otro lado, en las rocas ígneas y metamórficas la composición es la principal causa de variación de densidad; normalmente se incrementa cuando más básicas son las rocas por sus altos contenidos de minerales densos (máficas y ultramáficas) (Hinze et al., 2013). El conocimiento de las densidades de las rocas es necesario para la construcción del modelo geológico.

Los valores de densidad para las unidades se pueden obtener a partir de información primaria, mediante trabajo de campo y ensayos de laboratorio o mediante información secundaria cómo: datos de geología de superficie, información sísmica e información de pozos.

El modelamiento directo involucra cuatro pasos (Blakely, 1996):

1. Construcción de un modelo que se ajuste a las condiciones observadas (geología de superficie, información del subsuelo disponible como pozos, sísmológica, etc) y que involucre tanto como sea posible valores de las propiedades físicas a representar, en este caso, densidades, geometrías y profundidades de los cuerpos geológicos.
2. Computación de su anomalía gravimétrica y magnética (en algunos casos, como en este trabajo, se usa solo una).
3. Comparación de la anomalía calculada con la observada, se obtiene el error cuadrático medio y según la cantidad de información disponible se tiene un valor máximo de error aceptable.
4. Ajuste del modelo para incrementar la correspondencia entre la anomalía calculada y la observada y volver al paso 2, hasta el que el error obtenido sea aceptable, y buscando siempre proponer geometrías y densidades a los cuerpos, enmarcados en un modelo geológico viable para el área de estudio.

En el cálculo de la anomalía del modelo hay que tener en cuenta varios aspectos acerca de las soluciones que se quieren obtener. En gravimetría no hay unicidad en la solución,

porque existen un gran número de combinaciones entre distancias, densidades y geometrías que pueden tener el mismo efecto gravimétrico. Un ejemplo de esto se puede ver en la Figura 13, para una misma anomalía hay dos modelos que la replican con un error bajo, el primero tiene un cuerpo central más largo y profundo con una densidad menor y el segundo más somero y corto con una densidad mayor.

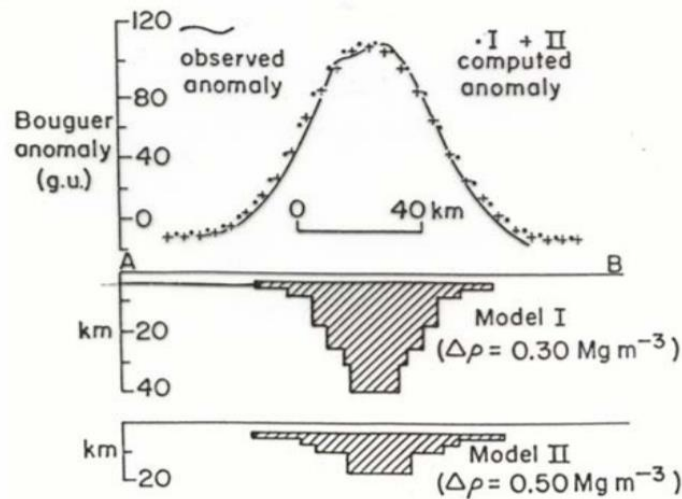


Figura 13. No unicidad de la solución en el modelamiento gravimétrico. Tomado de (Marescot, 2005)

En general, cuando se busca una solución en gravimetría es recomendable hacer uso de la Ley de Occam y suponer que el modelo que describe la fuente es lo más suave o simple posible, para evitar la sobreinterpretación de los datos y para eliminar las discontinuidades arbitrarias que pueden aparecer en el modelo, pero que no son esenciales para reproducir los datos observados (Blakely, 1996).

Los procedimientos para realizar el modelamiento consisten en permitir que todas las variables (contrastes de densidad, profundidad de las fuentes, geometrías, estructuras) varíen entre unos límites definidos, deben alinearse con la información disponible como la geología de superficie, datos de pozos, información de otros métodos geofísicos: sísmica, sismología, magnetometría, etc. El modelo debe tener sentido geológico, geofísico, estructural, reológico y tectónico.

Para definir las estructuras se puede utilizar el criterio reológico. La deformación de las rocas de la litósfera depende de factores como: su composición, gradiente geotérmico, espesor de la corteza y velocidad de deformación, es decir, de la estructura estratificada

vertical de la corteza. De acuerdo a la reología de las rocas se desarrollan las fallas, despegues y otras estructuras. Existen discontinuidades que son el resultado del cambio de las propiedades de las rocas y definen esta estructura cortical (Lowrie, 2007). En el modelamiento se incluyen discontinuidades y se propone el despegue de las fallas en uno de estos límites reológicos.

La primera discontinuidad encontrada sería la que divide la corteza continental en corteza superior (composición granítica) e inferior (composición basáltica), denominada discontinuidad de Conrad. Se encuentra en un rango de profundidad de 15 a 24 kilómetros, fue obtenida a partir del comportamiento de las ondas sísmicas al atravesar la corteza continental, las cuales aumentan discontinuamente al atravesar esta zona (Lowrie, 2013).

La siguiente discontinuidad es la de Mohorovic (Moho), corresponde a la transición entre la corteza y el manto. Se encuentra bajo la corteza oceánica a aproximadamente 7km y bajo los continentes su profundidad media es de 35km. La velocidad de las ondas sísmicas P y S aumenta bruscamente debido al aumento de la constante elástica del manto (Lowrie, 2013). En el modelo se propone un Moho somero bajo la SNSM.

La envolvente de resistencia a la deformación permanente para la litósfera fue definida por Goetze y Evans (1979) (Yield Strength Envelope YSE). Es un perfil vertical que predice el esfuerzo máximo soportado por una roca como función de la profundidad. Para una corteza continental típica el YSE muestra cambios de comportamiento reológico entre la corteza superior e inferior y el manto superior e inferior como se observa en la **Error! Reference source not found.**, coincidiendo con las discontinuidades mencionadas anteriormente.

A profundidades pequeñas, la línea recta corresponde a la fractura frágil, mostrando un incremento de la resistencia con la profundidad. A profundidades mayores la línea curva que describe la deformación dúctil muestra que la resistencia decrece con la profundidad exponencialmente debido al incremento de la temperatura y el correspondiente descenso de la viscosidad. La profundidad en la cual las resistencias frágil y dúctil son iguales denota la transición frágil-dúctil (BDT) que puede encontrarse en la corteza o en el manto superior (Tesauro et al., 2015).

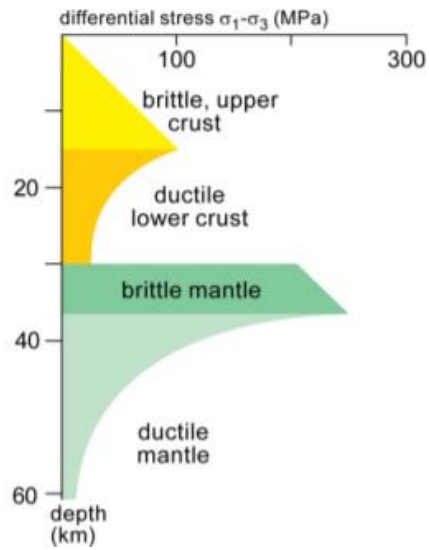


Figura 14. YSE corteza continental. Tomado de (Burg, 2017)

1.4.4. Ajuste

Para calcular el ajuste de la anomalía del modelo a la anomalía observada se calcula la raíz del error cuadrático medio (RMS). La RMS de los valores predichos se calcula para las T veces observadas como la raíz cuadrada de la diferencia entre la medida calculada y la observada al cuadrado dividida por las T observaciones realizadas. Cuanto más cercano a cero el RMS, más cercanos son los valores predichos por el modelo a los valores observados.

Estos últimos datos fueron tomados por Carson Helicopters Inc. entre febrero y junio de 2007 para la ANH. La adquisición comprende 10.805 km² de datos aerogravimétricos y aeromagnéticos. En la cuenca Cesar-Ranchería volaron 4.250 km y en la Alta y Baja Guajira 5.770 km, sobre una malla de vuelo de 5 km x 10 km y 785 km lineales sobre la Sierra de Santa Marta. Los datos geofísicos fueron adquiridos, respectivamente, a alturas promedios de 1.500 msnm, 1.220 msnm y 6.380 msnm (Figura 16).

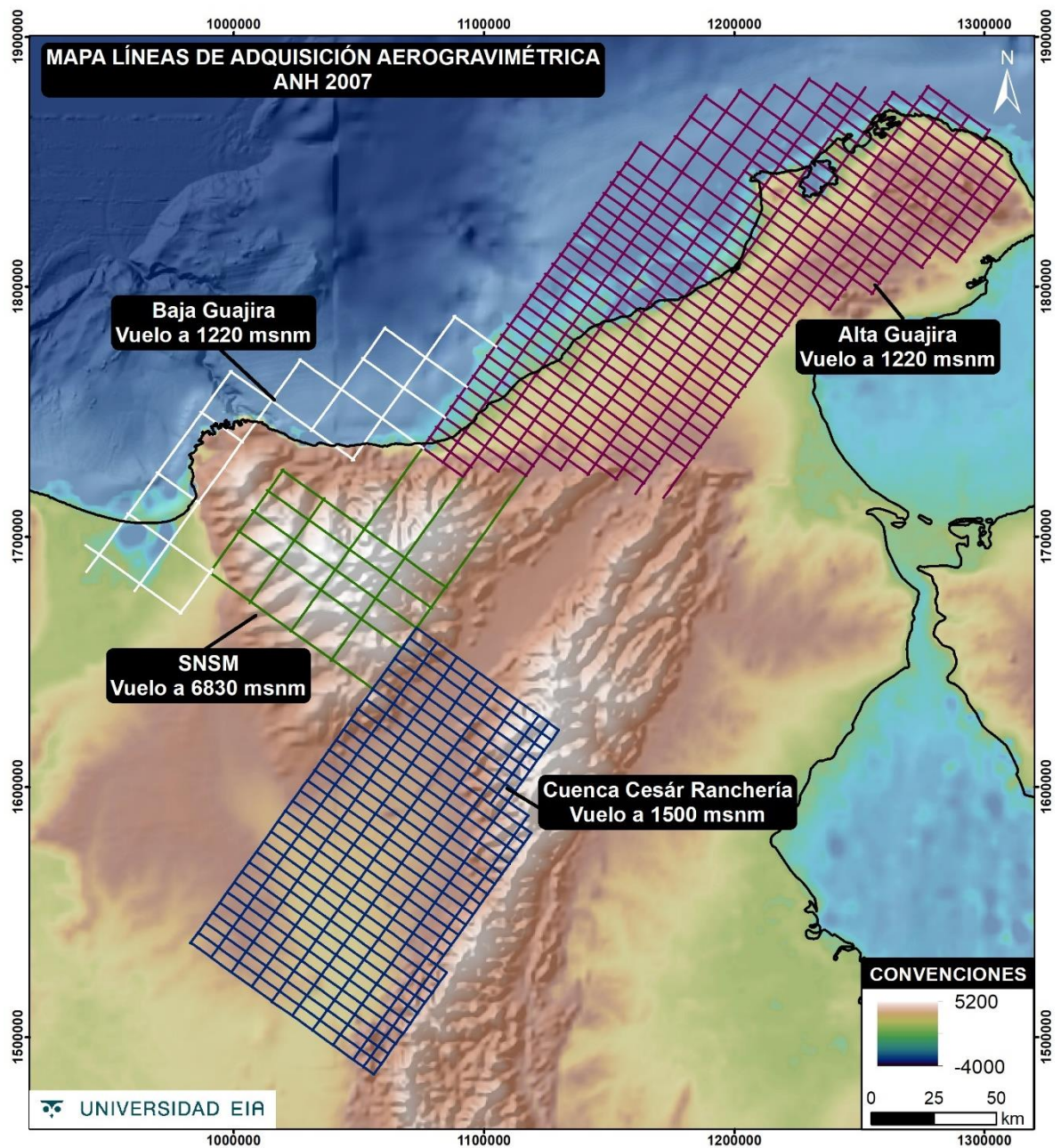


Figura 16. Líneas de vuelo de adquisiciones aerogravimetría y aeromagnetometría. ANH (2007)

2.1.2. Preprocesamiento de datos geofísicos

Las bases de datos con la información de las adquisiciones incluyen las coordenadas geográficas y planas (MAGNA), *raw data*, altitud, altitud ajustada,

medición de radar, *beam difference*, factores de corrección por latitud, eötvös, free air y Bouguer con 2.5 g/cm^3 y 2.67 g/cm^3 .

Se utiliza la anomalía de Bouguer corregida con 2.67 g/cm^3 para el modelamiento directo, los mapas, atributos gravimétricos y demás análisis; debido a que el 80% de las rocas de la SNSM son cristalinas y esa es su densidad aproximada (Tschanz et al., 1974).

Se realiza la interpolación de mínima curvatura, descrita por Swain (1976) y Briggs (1974), pues con este método se obtienen resultados bastante suavizados y superficies continuas y derivables al primer y al segundo grado (pendiente y curvatura). Este tipo de interpolación funciona bien para campos potenciales debido a que parte del principio de las reglas flexibles, en las cuales la presión ejercida en un punto produce una deformación que afecta un ambiente local determinado por unas fronteras. Físicamente y de manera análoga, un objeto con masa tiene influencia gravitacional sobre un volumen local (en teoría infinito, pero como la fuerza gravitacional disminuye con el cuadrado de la distancia se puede despreciar cuando el radio es grande).

Para cada adquisición se usan las opciones avanzadas de oasis montaj para la interpolación. El número de celdas a extender más allá de los datos es 50; con lo cual se logra una justa superposición de los ráster de las adquisiciones. El tamaño de celda depende de la densidad y distribución de la información: el algoritmo de interpolación comienza el ajuste con celdas de mayor tamaño, una vez logra ajustar la superficie reduce el tamaño de celda y comienza el ajuste nuevamente. El último tamaño para el cual hay convergencia será el tamaño de celda del resultado.

Sobre la SNSM el espaciamiento de los datos sobre una misma línea de vuelo es de 70m aproximadamente y entre líneas la separación aproximada es 20km; el grid obtenido tiene un tamaño de celda de 257.5m, valor máximo 201 mGal y mínimo 14mGal. La adquisición de la Baja Guajira tiene un espaciamiento sobre las líneas de vuelo de 55m aproximadamente y separación entre líneas de 20 y 30km; el grid obtenido tiene un tamaño de celda de 308m, un valor máximo de

151mGal y mínimo -46mGal. Para la adquisición al sur de la cuenca Cesar Ranchería y la Alta Guajira, el espaciamiento de datos de una línea es aproximadamente 50m y entre líneas la separación es 5 y 10km; los grids obtenidos tienen un tamaño de celda de 147 y 154m respectivamente. En el de la

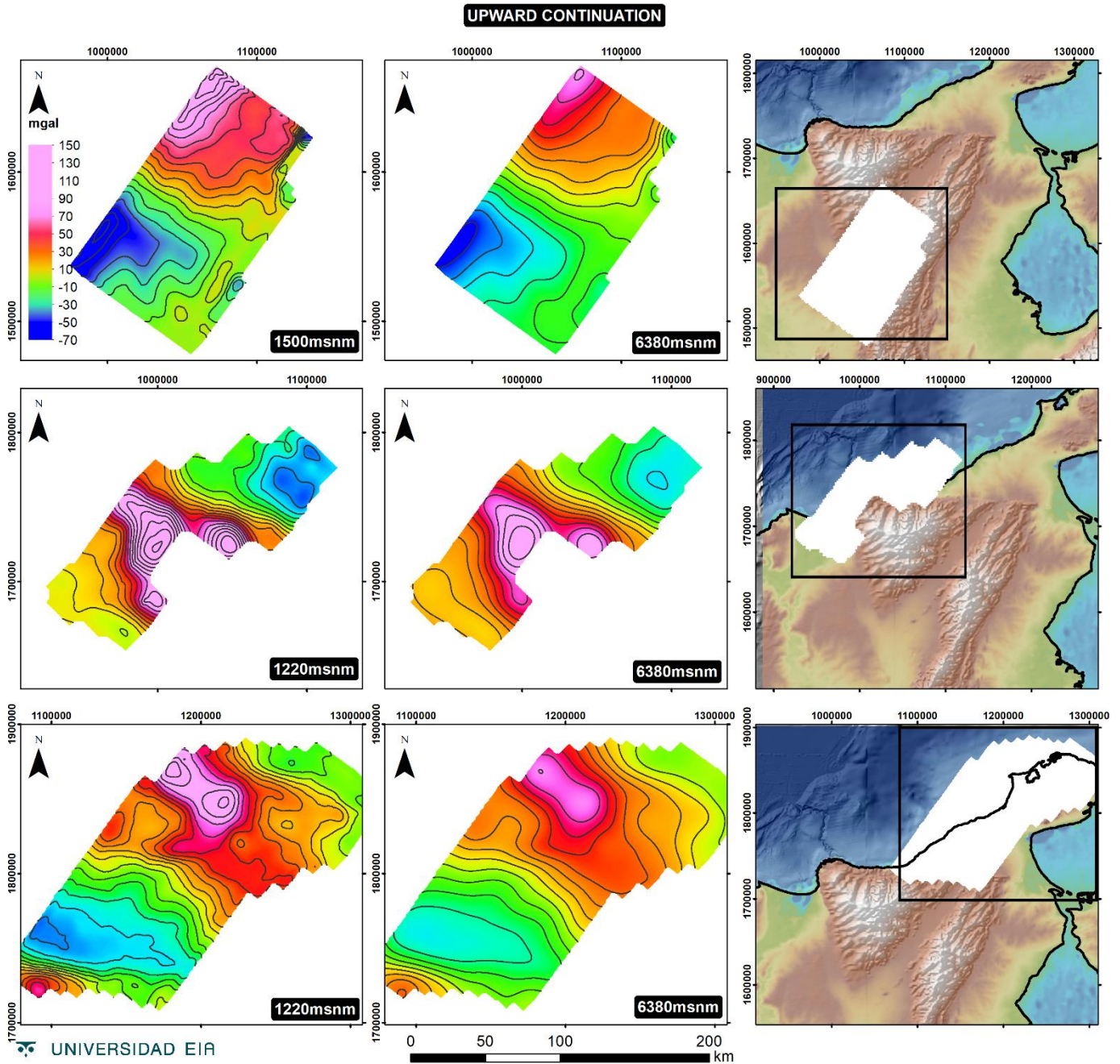


Figura 17. Continuación hacia arriba de los grids de 1500 y 1220 msnm a 6380 msnm

cuenca Cesar Ranchería el valor máximo es 115mGal y el mínimo -72mGal y en la Alta Guajira el valor máximo es 116mGal y el mínimo -43mGal. Los diferentes grids se pueden ver en la **Error! Reference source not found.**

Cómo se mencionó anteriormente, las adquisiciones fueron realizadas con distintas alturas de vuelo, por lo tanto, es necesario realizar el procedimiento de continuación hacia arriba para llevar toda la información a una misma altura (6830msnm) y así poder unificar la anomalía de Bouguer del área de estudio. Esta transformación atenúa las fuentes más someras y resalta las anomalías de onda larga, es decir, las fuentes profundas o regionales. En la **Error! Reference source not found.** se pueden ver los grids antes del procesamiento con anomalías locales (de onda corta) y luego a 6380 msnm el mapa muestra anomalías más regionales, se ven más suavizadas.

2.1.3. Definición de la escala de trabajo

El mayor tamaño de celda obtenido en la interpolación de mínima curvatura es 308 metros, sin embargo, los grids tienen una huella (*footprint*) asociada a la adquisición y grillado y por este motivo se realiza un procedimiento de remuestreo de los grids a 1km y 2km.

La opción usada para cambiar la resolución espacial del grid es la cúbica. Involucra una convolución y determina el nuevo valor de una celda basándose en el ajuste de una curva suave a través de los 16 centros de celdas más cercanas. Para los datos continuos es la más apropiada, geométricamente distorsiona menos el ráster. La desventaja de esta opción es que necesita más tiempo de procesamiento en comparación a la bilineal y de vecino cercano (ESRI, 2018).

Con el remuestreo de 2km se obtiene un resultado con menor footprint y sin perder los rasgos principales que se observan en los grids por separado. Además, funciona bien en la unión de los grids de las distintas adquisiciones y en el procesamiento posterior que involucra derivadas espaciales y otros atributos gravimétricos.

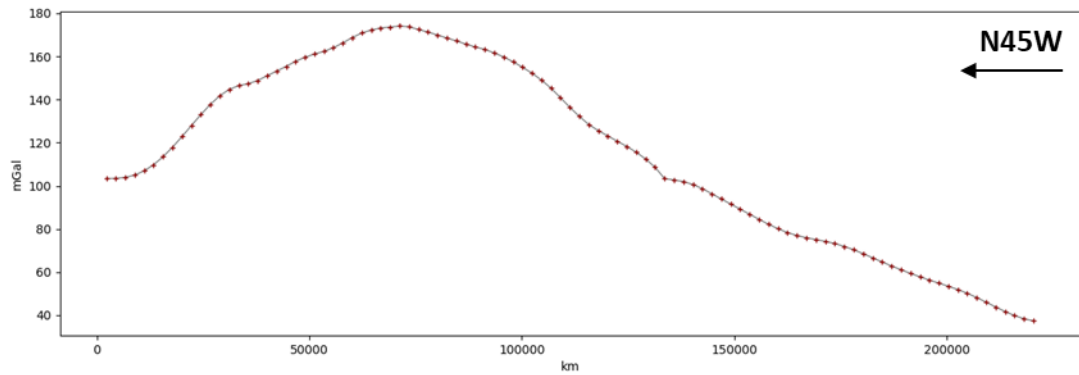
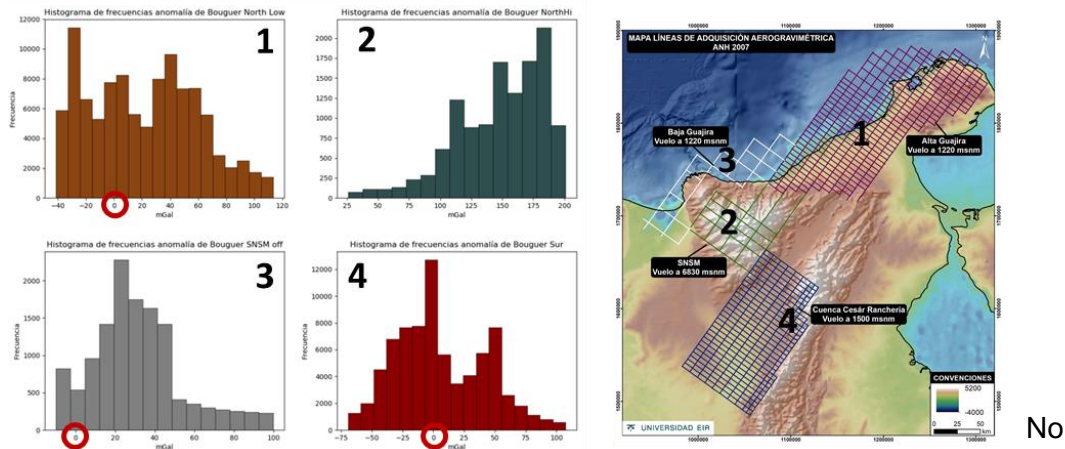


Figura 18. Datos de gravedad observada para el perfil modelado. Espaciamiento entre datos (cruces +) 2.2km.

Por otro lado, la escala utilizada en el modelo gravimétrico directo está relacionada con el menor cuerpo modelado y la distancia de las estaciones que define la curva de anomalía de Bouguer observada. El menor cuerpo lateral modelado es la franja noroeste del gneis de Buritaca (separado por el lineamiento de Sevilla) con un ancho aproximado de 5km y profundidad 16km. El modelo tiene 220km de longitud y 100 estaciones definidas, es decir, el espaciamiento entre las observaciones de anomalía de Bouguer es 2.2km (Figura 17).

2.1.4. Control de calidad de la información

Se realizan histogramas de los datos para determinar si hay valores extremos (*outliers*), es decir, valores del conjunto de datos excepcionalmente diferentes (alejados de la mediana) al resto de valores (Figura 18).



No

Figura 19. Histograma de frecuencias de anomalías de bouguer por adquisiciones

se encontraron outliers en los conjuntos de datos. Las anomalías varían entre -72 mGal y 202 mGal. Se puede ver que las anomalías más altas se encuentran en el área del grid sobre la SNSM (2 en Figura 18) y las más bajas sobre la cuenca Cesar Ranchería (4 en Figura 18) y la Alta Guajira (1 Figura 18) como se esperaría por sus características.

2.2. CONSTRUCCIÓN DE MODELO GEOLÓGICO

2.2.1. Diseño del modelo geológico

El perfil del modelo geológico-geofísico tiene una orientación NW-SE, cubre la SNSM y la cuenca Cesar Ranchería como se ve en la Figura 20 y es perpendicular a casi todas las estructuras (ver Figura 2). Las rocas que cruza el perfil según el mapa geológico de Colombia del Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Gómez Tapias et al., 2015), del NW al SE, son: el Batolito de Santa Marta (E2-Pi), los Esquistos de Gaira (K2-Mbg8), el Gneis de Buritaca (T-Mmg3), los Batolitos Central, Aracataca, Atánquez y Bolívar (J-Pi), las Granulitas de los Mangos (MP3NP1-Mag2), los Batolitos de Pueblo Bello y Patillal (J-Pi), las Ignimbritas de Los Clavos (J2J3-VCc), las Riolitas del Golero (b2-Vf), y la Formación La Quinta (J1J2-VCct) y los depósitos cuaternarios sobre la cuenca Cesar Ranchería.

subhorizontal o un *detachment*, ubicado posiblemente entre la corteza superior e inferior, relacionado con el cambio reológico de las rocas, propuesto por Audemard & Audemard (2002) y Cediel et al. (2003). A diferencia de los modelos anteriormente mencionados no se modela una corteza engrosada bajo el macizo, pues la anomalía gravimétrica (+200 mGal) no lo sugiere y por lo tanto el modelo es una versión modificada.

En el modelo se propone el *detachment* en la discontinuidad de Conrad debido al cambio reológico de las rocas y un Moho somero bajo la SNSM.

También es importante definir el límite entre la corteza oceánica y continental para el modelo geológico-geofísico. Se utiliza el límite propuesto por Restrepo et al. (2017) interpretado a partir de datos de gravimetría y magnetometría. Para el perfil NW-SE a modelar se encuentra a 100km de la línea de costa.

Un basculamiento regional al este se introduce para ajustar el tren regional de la anomalía.

2.2.2. Estimación de los parámetros de entrada

La densidad de los cuerpos es asignada con información secundaria. Los datos iniciales de densidad se toman de la tesis de Cerón (2007): el Moho, la corteza inferior y superior y los sedimentos, como se puede ver en la

Tabla 3.

Tabla 3.

Datos para modelo gravimétrico de Cerón (2007)

Tops	Age (Ma)	Surface	Marker	COMPOSITION (%)				ρ (g/cm ³)
Moho								3,3
Lower Crust								3,05
Middle Crust								2,9
Oceanic Crust								2,8 - 2,9
Upper crust	94		Bsmt	Ss	Sh	Lm	Cht	2,67
Cretaceous, Sedim	61		Ku	0	0	0	100	2,45 - 2,6
Early Eocene	49,5		TeL	40	50	0	10	2,43 - 2,54
A" Reflector	39,5	TST	Tem	80	15	5	0	2,40 - 2,49
Oligocene	28,4		Tou	60	40	0	0	2,35 - 2,47
Intra lower Miocene	22	LST	Tmo	45	40	15	0	2,23 - 2,46
Burdigian	17,5		TmL	20	80	0	0	2,19 - 2,40
Middle Miocene	15,5	MFS	TmM	60	40	0	0	2,06 - 2,34
Lower Pliocene	3,8		TplL	70	30	0	0	2,00 - 2,20
Pleistocene			Tpli	90	10	0	0	1,98 - 2,13
Water	0	0		Ss	Sh	Lm	Cht	1,03

Para la densidad de las rocas que afloran se utilizó un valor dentro del rango establecido según su litología, como se puede ver en la Figura 21.

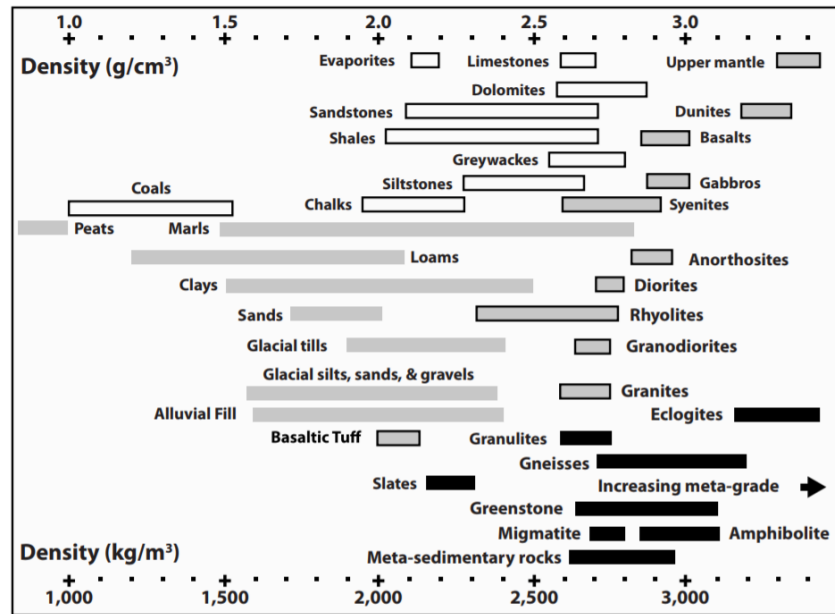
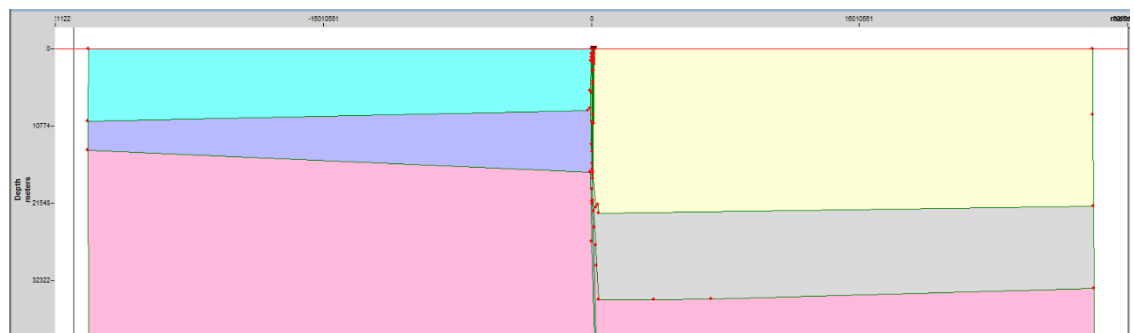


Figura 21. Rangos de valores de densidad de rocas según litología. Tomado de (Hinze et al., 2013).

2.2.3. Implementación de algoritmos para cálculo de señal geofísica sintética

Para los cálculos de la anomalía gravimétrica se utiliza GM-SYS de Oasis Montaj[®], el cual utiliza un modelo bidimensional de la Tierra, donde asume que esta tiene topografía, pero no curvatura y se extiende a +30.000 kilómetros y -30.000 kilómetros a lo largo del perfil para eliminar los efectos de borde (Figura 22)



(Northwest Geophysical Associates, 2004).

Figura 22. Extensión lateral del modelo de gm sys (aprox 30.000km a cada lado) para evitar los efectos de borde.

2.2.4. Mapa de anomalía de Bouguer

En el preprocesamiento se realiza la interpolación de mínima curvatura y continuación hacia arriba para cada adquisición. Con el fin de tener mapas de anomalía de Bouguer a una misma altura y poder compararlos y unirlos. Este procedimiento de unión se hace utilizando grid knitting en Oasis Montaj ®. El método permite unir varios grids utilizando diferentes funciones de suavizado.

Se realiza la unión utilizando *blending* y *suture*. El primer método, *blending*, usa funciones de suavizado estándar. La función determina el peso del valor de un grid en comparación con el otro en la región de superposición. La Figura 23 muestra la distancia de un punto al borde de cada grid como D1 (al grid 1) y D2 (al grid 2). El método usa una función coseno que varía de 0 a 1 (0.5 es la mitad de la distancia entre los dos grids). Si la posición es equidistante a los dos grids, entonces el valor será el promedio de los valores de cada grid. Cuando no es así, como en la Figura 23, donde el grid 1 tiene un valor de 0.7 en la gráfica de coseno y el grid 2 un valor de 0.3; el valor final será la multiplicación de 0.7 por el valor del grid 1 y 0.3 por el valor del grid 2 (Geosoft, 2013).

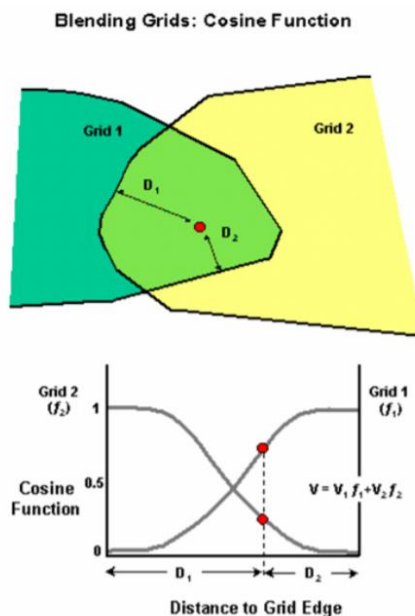


Figura 23. Grid knitting método blending. Tomada de (Geosoft, 2013)

El segundo método, *suture*, permite la definición de manera manual o automática de una ruta de unión y luego aplica una corrección multifrecuencia para eliminar las diferencias entre las celdas de los grids a lo largo de la ruta, es más efectivo cuando los grids a unir tienen poca área de superposición. Un valor de 0 a 1 determina como se reparten las correcciones sobre los grids, para una función con peso 0.25 (línea punteada más a la izquierda en la Figura 24) el valor de un punto en la superposición será el 25% del valor del grid 1 y 75% del grid 2 (similar a blending). En este caso se usa la opción automática que ubica la ruta por la bisectriz del área de superposición, es decir que el valor para cada grid es 0.5.

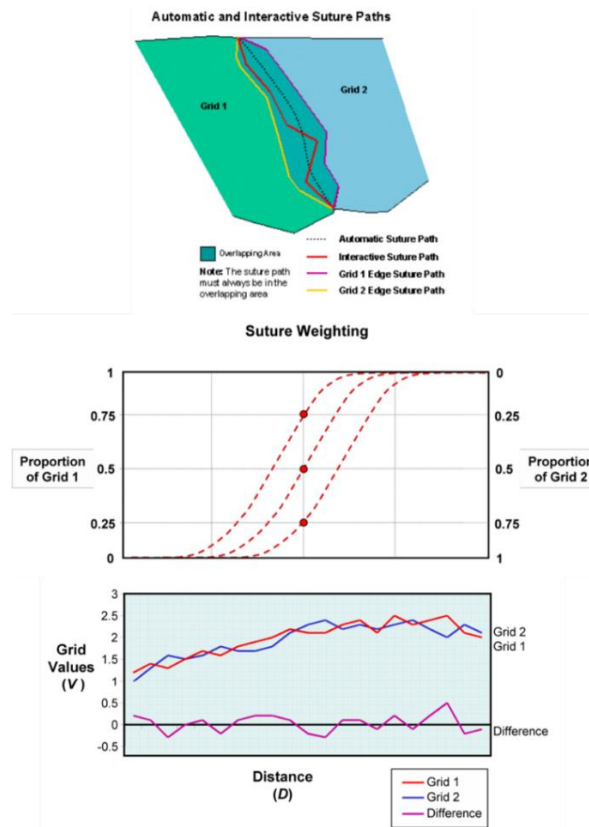


Figura 24. Grid knitting método Suture. Tomada de (Geosoft, 2013)

Para asegurar que el proceso de sutura crea un grid suavizado, el algoritmo realiza una transformada de Fourier (FFT Frequency Fourier Transform) a los dos grids y los compara como se ve en la Figura 24, la curva roja es la diferencia. Se usa una transformada de Fourier para dividir la curva de la diferencia en muchas curvas que representan distintas frecuencias o longitudes de onda y luego una corrección

en cascada se aplica a cada frecuencia en proporción, es decir, las frecuencias cortas tienen una corrección corta y las largas una corrección larga. La superficie de corrección para cada frecuencia se añade al área de superposición del grid para que éste se una perfectamente en los bordes (Geosoft, 2013).

Para este caso se obtuvo un resultado mejor con el método suture debido a que el área de superposición entre los grids de las adquisiciones era poco.

2.3. MODELAMIENTO DIRECTO

2.3.1. Parámetros de entrada

El modelo consideró 9 unidades geológicas superficiales, 1 unidad de fondo, 3 unidades más profundas y agua (Tabla 4).

Para la corteza superior las densidades se asignan de acuerdo a la litología de las rocas aflorantes, tomadas del Mapa geológico de Colombia del SGC (2015), como se puede ver en Figura 25. Se agrupan por litologías quedando 9 unidades.

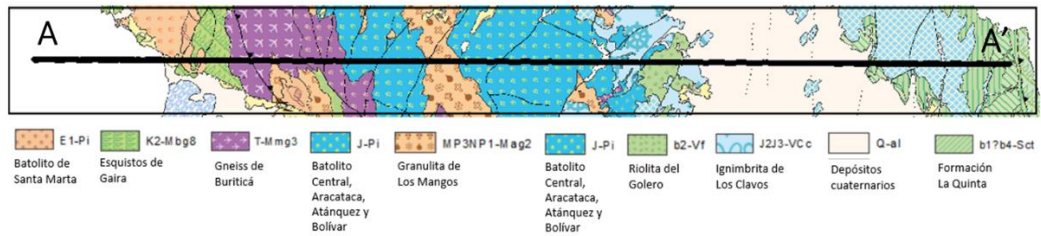


Figura 25. Geología superficial del perfil modelado

La densidad de referencia es 2.67g/cm^3 la densidad promedio de la corteza continental y para las unidades más profundas: la corteza inferior, el Moho y la placa Caribe se utilizan valores de referencia según la tabla de Cerón (2007) mencionada anteriormente (Tabla 4).

Tabla 4.

Cuerpos del modelo directo con el valor de densidad utilizado, litología y el rango de densidad según la literatura. Tabla elaboración propia

Cuerpo	Densidad	Litología	Rango
Esquistos de Gaira	2.57	Esquistos y filitas	2.34 – 2.90
Batolito de Santa Marta	2.66	Tonalitas y ocasionalmente dioritas, granodioritas y granitos	2.55 – 2.90
Gneis de Buritaca al oeste de la falla Orihuaca	2.73	Neises cuarzo feldespáticos con hornblenda y plagioclasa, anfibolitas, neises esquistosos, esquistos, migmatitas.	2.70 – 3.00
Rocas Metamórficas No Diferenciadas al este de la falla Orihuaca	2.76		2.70 – 3.00
Granulita de Los Mangos	2.78	Granulitas, anfibolitas y neises	2.55 – 3.20
Batolito Central, Aracataca, Atanquez y Bolívar	2.68	Granodiorita, monzodioritas, dioritas, tonalita	2.60 - 2.80
Batolito Pueblo Bello y Patillal	2.69	Facies Cuarzo monzonita, Facies Granito y Facies Granito Granofírico	2.55 – 2.80
Ignimbritas de Los Clavos y Riolita del Golero	2.72	Tobas e ignimbritas de composición félsica a intermedia traquítica a andesítica	2.40 – 2.80
Cuenca Cesar Ranchería	2.60		2.45 – 2.60
Corteza continental superior	2.67		2.67
Corteza continental inferior	2.80		2.80 – 2.90

Placa Caribe	2.90	Corteza oceánica	2.80 – 2.90
Moho	3.30		3.30 - 3.45
Agua salada	1.03	Agua salada	1.03

La geometría del modelo está relacionada en la corteza superior a las estructuras que tienen expresión en superficie como las fallas del mapa geológico y a la naturaleza de los cuerpos. Las ignimbritas son subaéreas con espesores de 1km aproximadamente. Los intrusivos tienen una geometría de gota invertida. Los cuerpos metamórficos tienen estructuras tabulares generalmente.

La profundidad de emplazamiento de los plutones Mesozoicos, inferidos por su petrografía según Tschanz et al. (1974), disminuye al sureste del lineamiento de Sevilla. Los batolitos porfiríticos Jurásicos del cinturón central son mesozonales (aprox 10km de profundidad). Los intrusivos fallados tienen una profundidad mayor pues su emplazamiento está ligado a la falla.

Al definir la dirección y longitud del perfil e ingresar la información de anomalía de Bouguer se puede también añadir la topografía y otra información de superficie como los mapas de las fallas y las unidades cronoestratigráficas para amarrar el modelo a esta información.

Se utiliza la opción de perfil a partir de mapa, se carga el grid de anomalía de bouguer y el shape del perfil, manualmente se selecciona sobre el grid el punto inicial y final que coinciden con la línea de la Figura 20, la extensión del perfil son 220km.

2.3.2. Cálculo del error cuadrático y ajuste al error mínimo

El software utiliza la raíz del error cuadrático medio (RMS root mean square) como medida de la diferencia entre los valores predichos por el modelo y los valores observados.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (\hat{y}_t - y_t)^2}{T}}$$

El RMS de los valores predichos se calcula para las T veces observadas como la raíz cuadrada de la diferencia entre la medida calculada y la observada al cuadrado dividida por las T observaciones realizadas (Ecuación 8). Cuando más cercano a cero el RMS, más cercanos son los valores predichos por el modelo a los valores observados.

2.4. INTERPRETACIÓN DEL MODELO

2.4.1. Atributos gravimétricos

Para interpretar estructuras, geometría de los cuerpos geológicos, contrastes de densidades, entre otros, se extraen atributos gravimétricos para cada adquisición por separado. Los datos fueron adquiridos a distintas alturas de vuelo y para unirlos sería necesaria la continuación hacia arriba para ubicarlos a la misma altura, con lo cual se pierden frecuencias altas lo que resulta en menor información. Por esta razón, se analizan los grids por separado.

Los atributos gravimétricos que se interpretan son señal analítica, derivada generalizada y derivada tilt. La señal analítica es buena para identificar contrastes litológicos, el máximo ocurre sobre el cuerpo de densidad diferente y el contacto es aproximadamente bajo la inflexión de la curva, de igual manera funciona la derivada generalizada pues es una variación de señal analítica. Por lo tanto, la interpretación para estos atributos consiste en delinear las inflexiones del grid.

La derivada tilt en cambio es mejor para delimitar estructuras como fallas, diques, etc. El ángulo tilt es positivo sobre la fuente, cero en los bordes o cerca de ellos y negativo por fuera del cuerpo. La interpretación consiste en limitar las tendencias de ángulo tilt cercano a cero.

La interpretación de los atributos es integrada al modelamiento directo, las estructuras identificadas en estos mapas se usan en el modelo.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La anomalía de Bouguer más alta es de 200 mGal y se encuentra sobre la SNSM, la anomalía más baja es -20 mGal y se encuentra en la cuenca Cesar Ranchería (Figura 26). Al unir los datos se ven rasgos y estructuras, de las cuales se destacan: anomalías cercanas a cero y negativas en las cuencas sedimentarias Cesar Ranchería con un depocentro con eje NE y la Alta Guajira con depocentro aproximadamente NW siguiendo el trazo de la falla Oca-El Pilar. La SNSM muestra una anomalía positiva entre 100 y 200 mGal. Existe una zona de transición entre las anomalías positivas de la SNSM y las cercanas a cero o negativas de la cuenca Cesar Ranchería y Alta Guajira que podría indicar la pendiente del basamento. Hacia la cuenca Cesar Ranchería en sentido SW más pendiente que en el SE y hacia la Alta Guajira más pendiente a las anteriores.

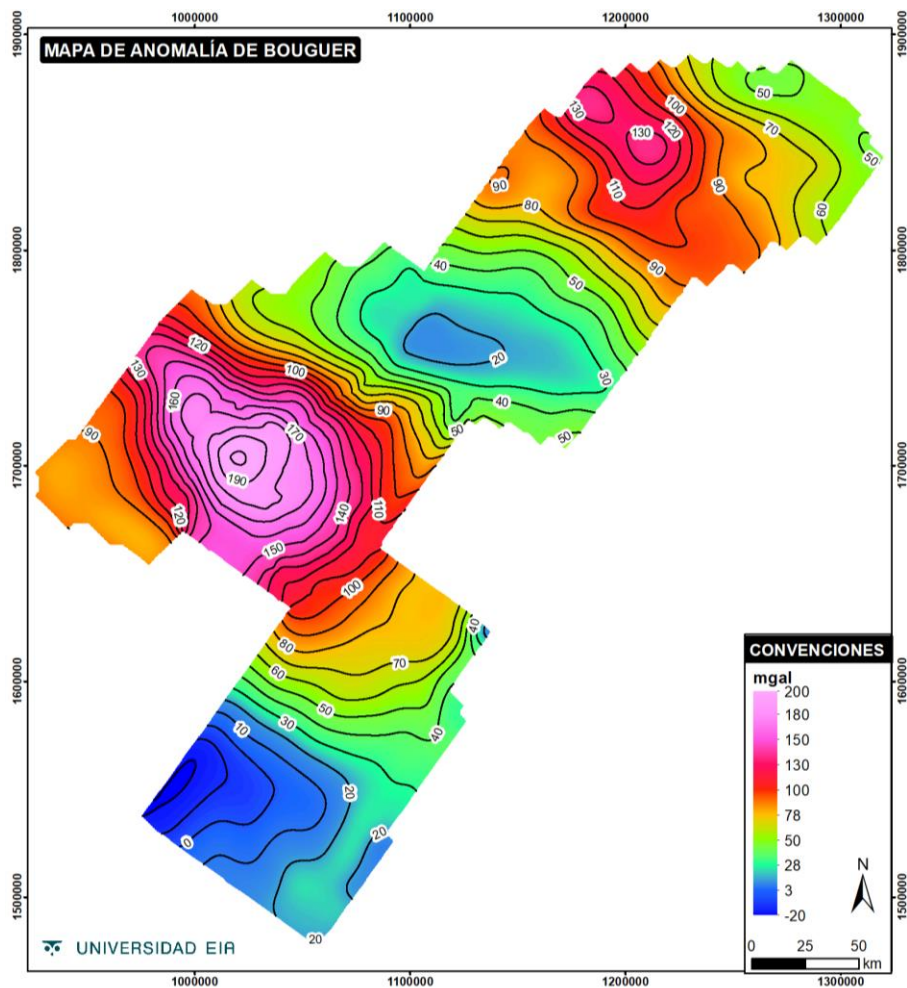


Figura 26. Mapa de anomalía de Bouguer

En los mapas de la señal analítica (Figura 27) hay un footprint en dirección NE relacionado a la adquisición. Podría eliminarse si se realiza con un tamaño de celda mayor, pero se podrían perder otras estructuras; en esta dirección no están la mayoría de las estructuras de interés y por ello se analiza así el resultado de este atributo.

La señal analítica resalta estructuras que corresponden a fallas geológicas mapeadas en superficie. El atributo sobre la adquisición de la Baja Guajira muestra la falla de Oca - El Pilar compartimentalizada y resalta la falla Santa Marta Bucaramanga con rumbo NW. La falla Jordán también tiene una expresión clara, según Colmenares et al. (2007) hay evidencias del movimiento lateral dextral de la falla (5 km), pone en contacto el Batolito de Santa Marta con los esquistos de Gaira y los esquistos de San Lorenzo.

Sobre la adquisición de la SNSM se observa una estructura curva con rumbo N30E que correspondería a la falla de Orihueca, que pone en contacto dos unidades metamórficas: el Gneis de Buritaca con rocas metamórficas no diferenciadas, su expresión en profundidad indicaría que buza al SE así como lo describe Hernández (1996).

El lineamiento de Sevilla también tiene una expresión, aunque no continua por todo el trazado superficial. Al SW se puede observar una estructura que sería la falla que pone en contacto la Granulita de Los Mangos con los Batolitos de Pueblo Bello y Patillal. La falla de Achocuereba también puede mapearse con señal analítica.

En el mapa de la adquisición sobre la cuenca Cesar Ranchería se ve la expresión de la falla de Santa Marta – Bucaramanga y al interior de la cuenca algunas expresiones que corresponden con fallas cubiertas mapeadas en el mapa geológico del SGC, entre ellas la Falla de Arenas Blancas. No es claro el lineamiento Cesar.

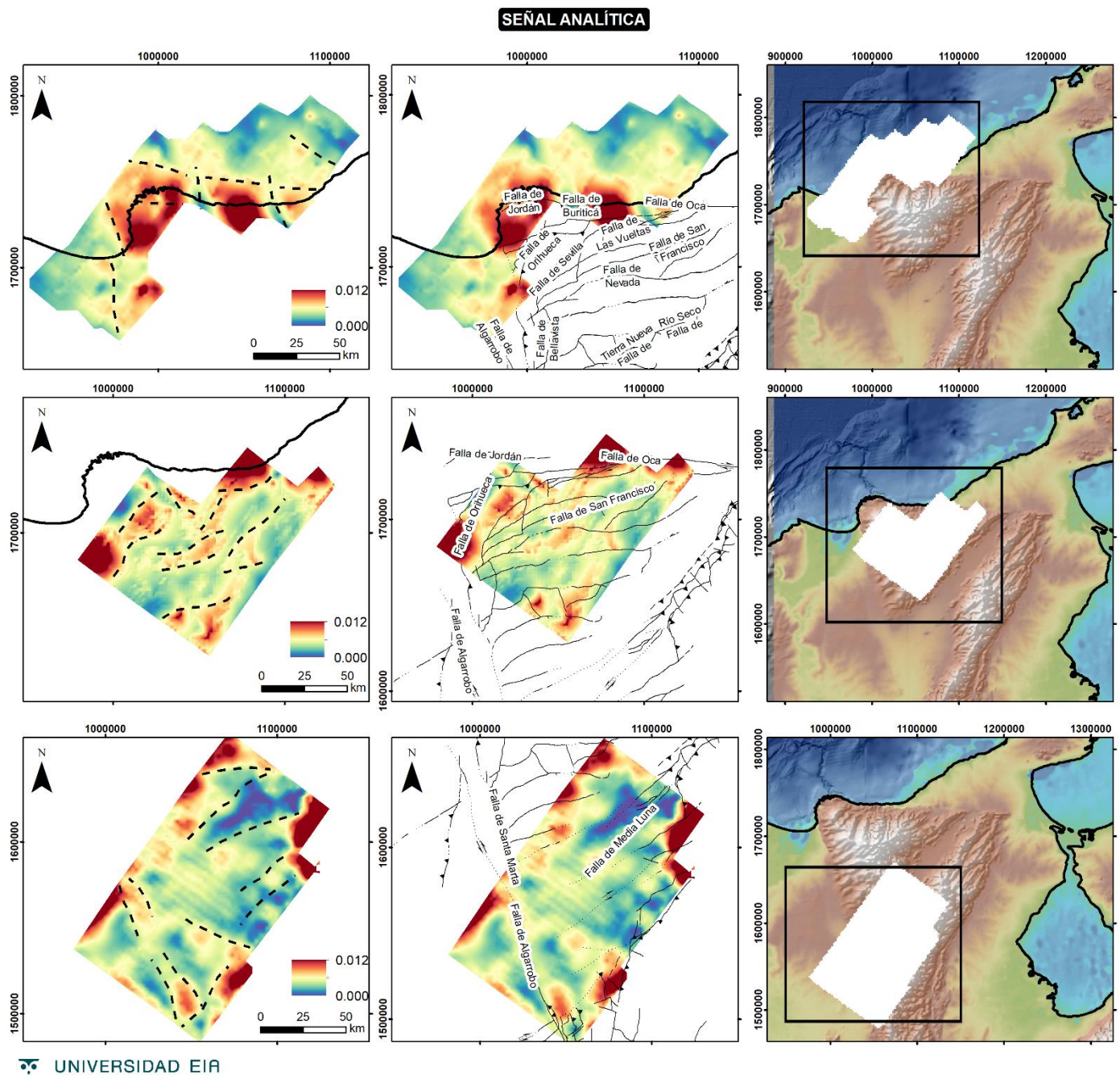


Figura 27. Señal analítica. Los valores varían de 0 a 0.031, no tienen interpretación cuantitativa, la inflexión indica las estructuras o contactos.

En los mapas de la derivada generaliza (Figura 28, 30 y 31) se realizaron con azimut cero (N-S) para resaltar principalmente estructuras con orientación E-W, con azimut 45° (NE)

para resaltar estructuras con orientación NW y con azimut 90° (E-W) para resaltar estructuras N-S.

La falla Oca-El Pilar se destaca en las tres derivadas generalizadas pero su expresión es más fuerte en la derivada con azimut 45°, esto se esperaría pues su rumbo es aproximadamente perpendicular a este azimut. También se destaca la falla Santa Marta Bucaramanga en el grid más al norte y más al sur, no es fácil interpretarla en la derivada con azimut 90°.

En la zona central de la SNSM se observa, así como en señal analítica, la falla de Orihueca con un rumbo N30E aproximado. El lineamiento de Sevilla tiene una expresión más notoria en la derivada con azimut 90°.

También es visible la estructura que correspondería la Falla de Las Vueltas que pone en contacto La Granulita de Los Mangos contra sedimentos terciarios de la Formación Monguí (Colmenares et al., 2007).

En el mapa de la adquisición sobre la cuenca Cesar Ranchería se ve la expresión de la falla de Santa Marta – Bucaramanga y al interior de la cuenca algunas expresiones que corresponden con fallas cubiertas mapeadas en el mapa geológico del SGC, entre ellas la Falla de Arenas Blancas.

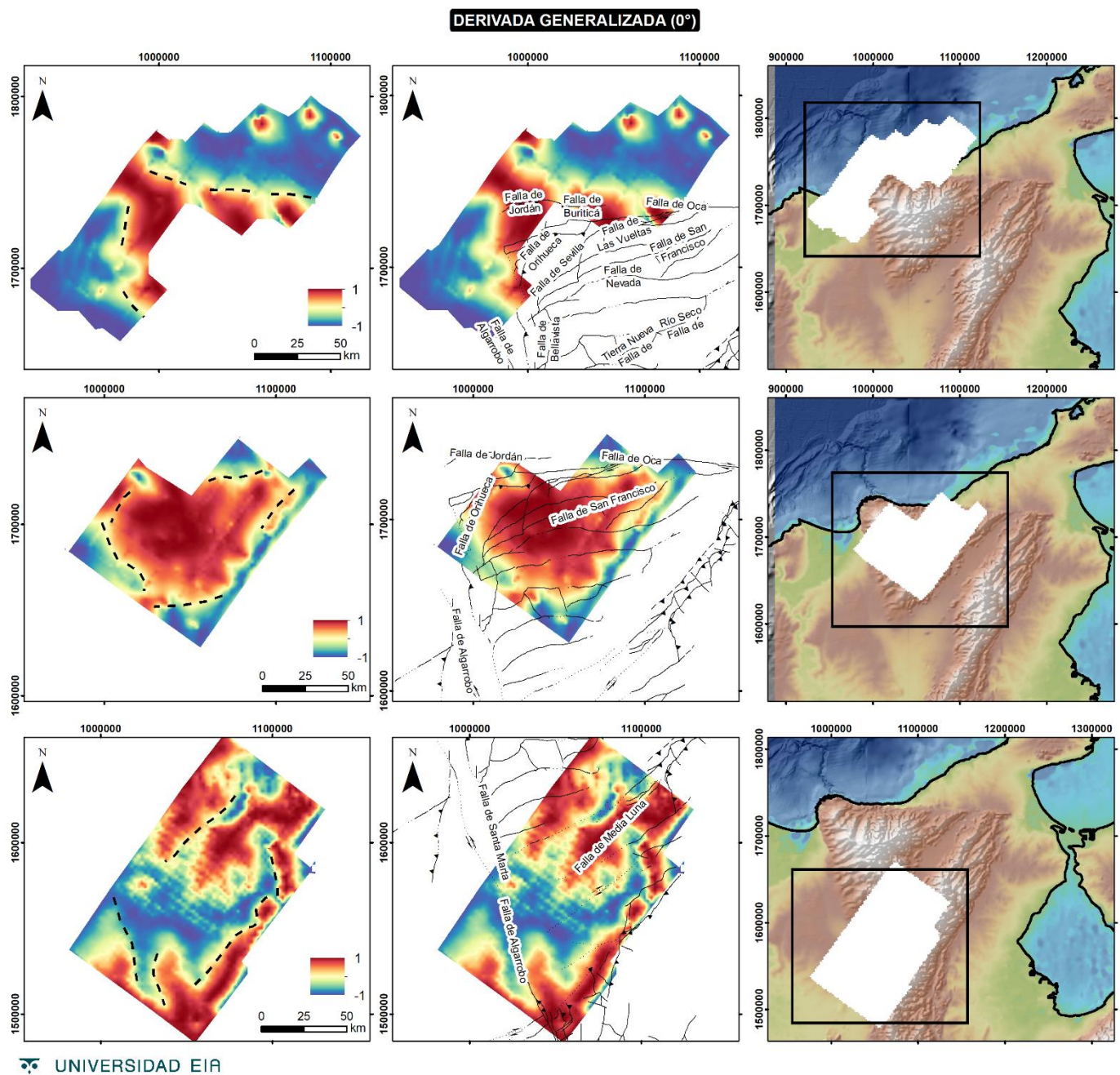
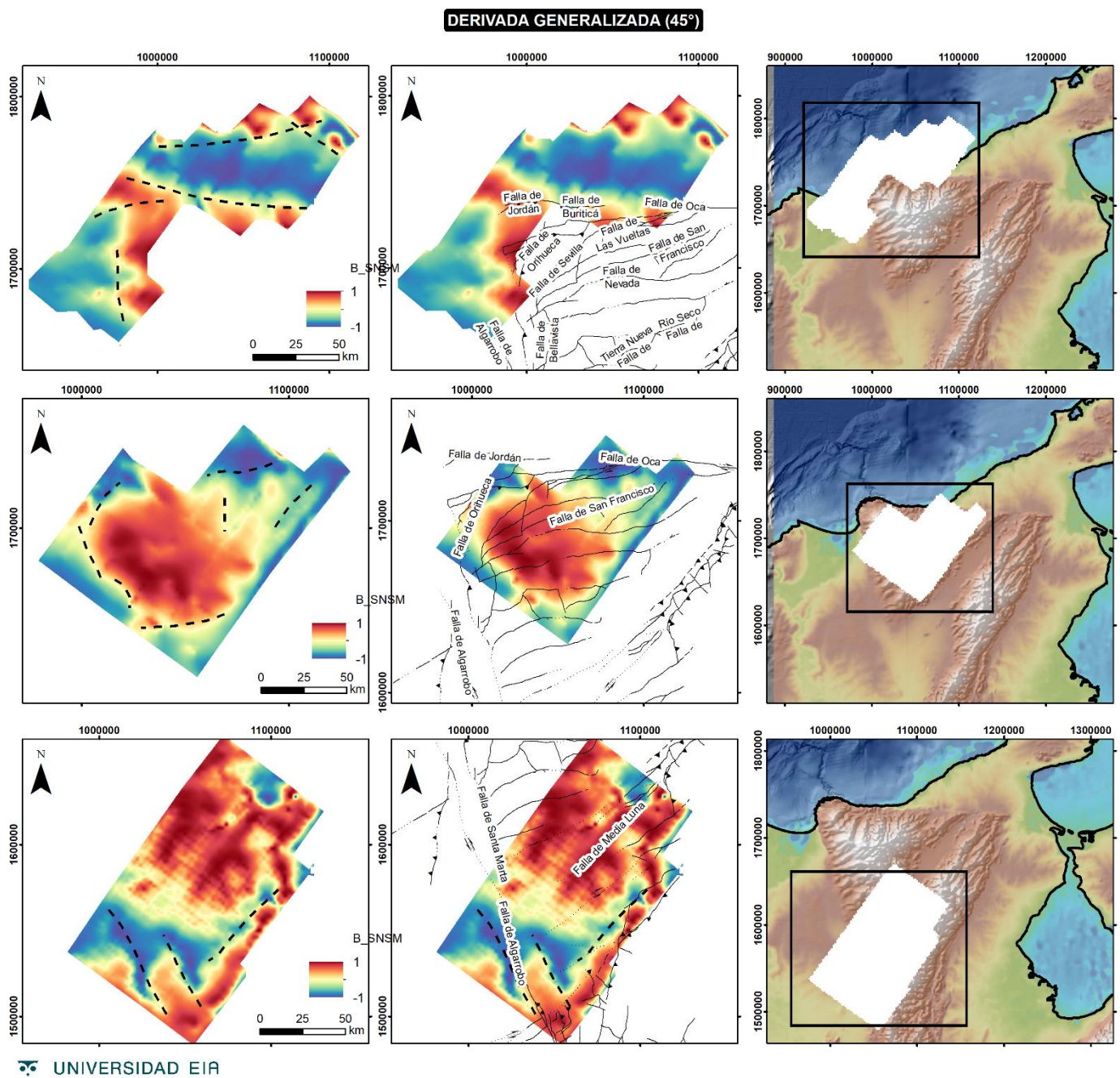


Figura 28. Derivada generalizada con azimuth 0°. Los valores tienen un rango entre -1 y 1, no tienen una interpretación cuantitativa pero el 0 es aproximadamente el borde de los cuerpos o corresponde a las estructuras.



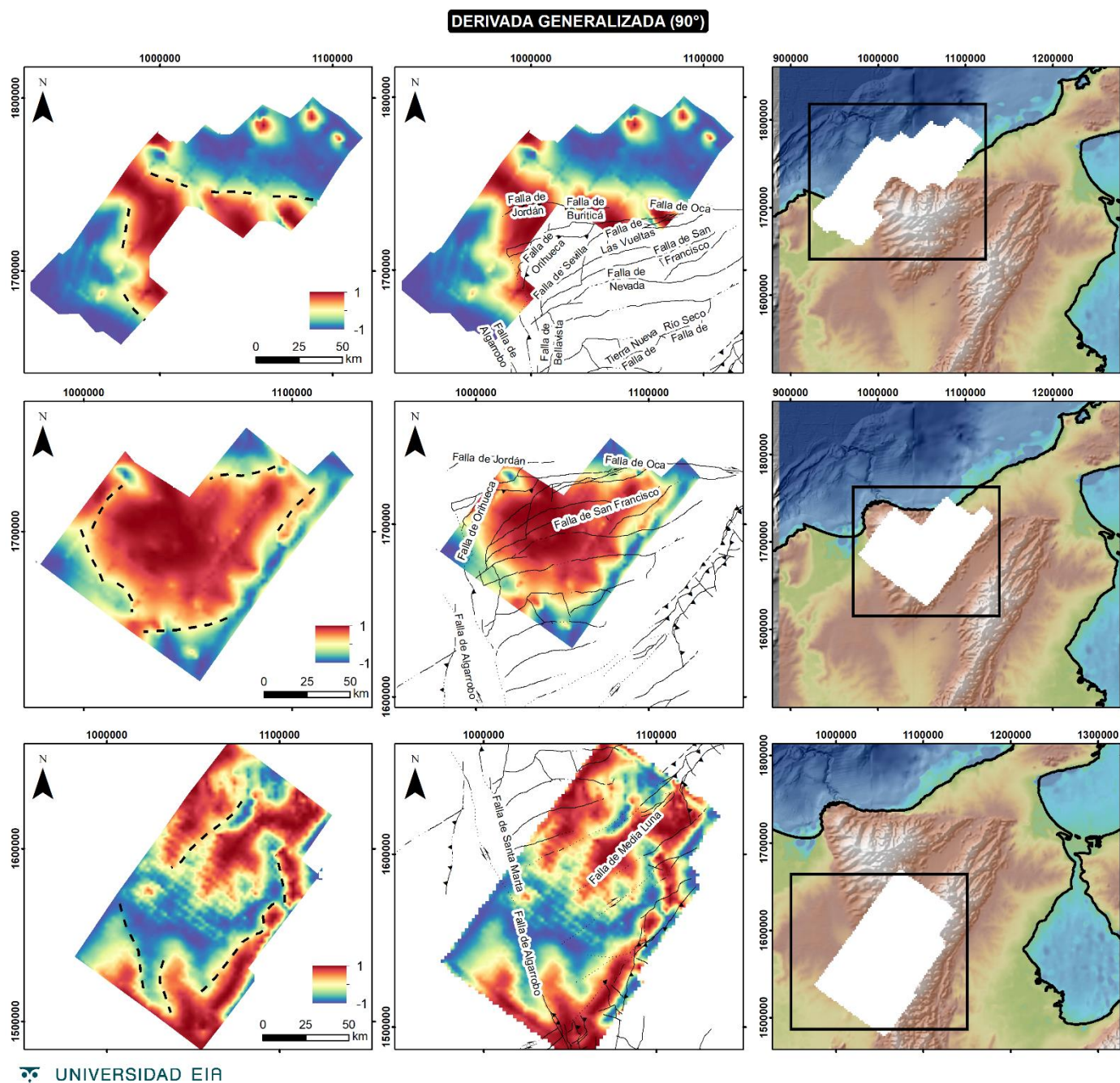


Figura 30. Derivada generalizada azimuth 90°. Los valores tienen un rango entre -1 y 1 , no tienen una interpretación cuantitativa pero el 0 es aproximadamente el borde de los cuerpos o corresponde a las estructuras.

La derivada tilt (Figura 31) destaca la falla Oca – El Pilar en al menos 3 bloques y la falla Santa Marta – Bucaramanga en 2. Se ve claramente el lineamiento de Sevilla, la falla de San Francisco (subparalela a las de San Antonio y San Miguel) y que transporta rocas de la Granulita de Los Mangos, el Batolito Central y la Formación Corual.

También es visible la estructura que correspondería la Falla de Las Vueltas que pone en contacto La Granulita de Los Mangos contra sedimentos terciarios de la Formación Monguí.

En la cuenca Cesar Ranchería se identifica la falla del Espíritu Santo y el límite entre los depósitos cuaternarios y los conglomerados y arenitas líticas de las formaciones Zambrano y Cuesta. Otras expresiones corresponden a fallas cubiertas mapeadas en el mapa geológico del SGC (2015).

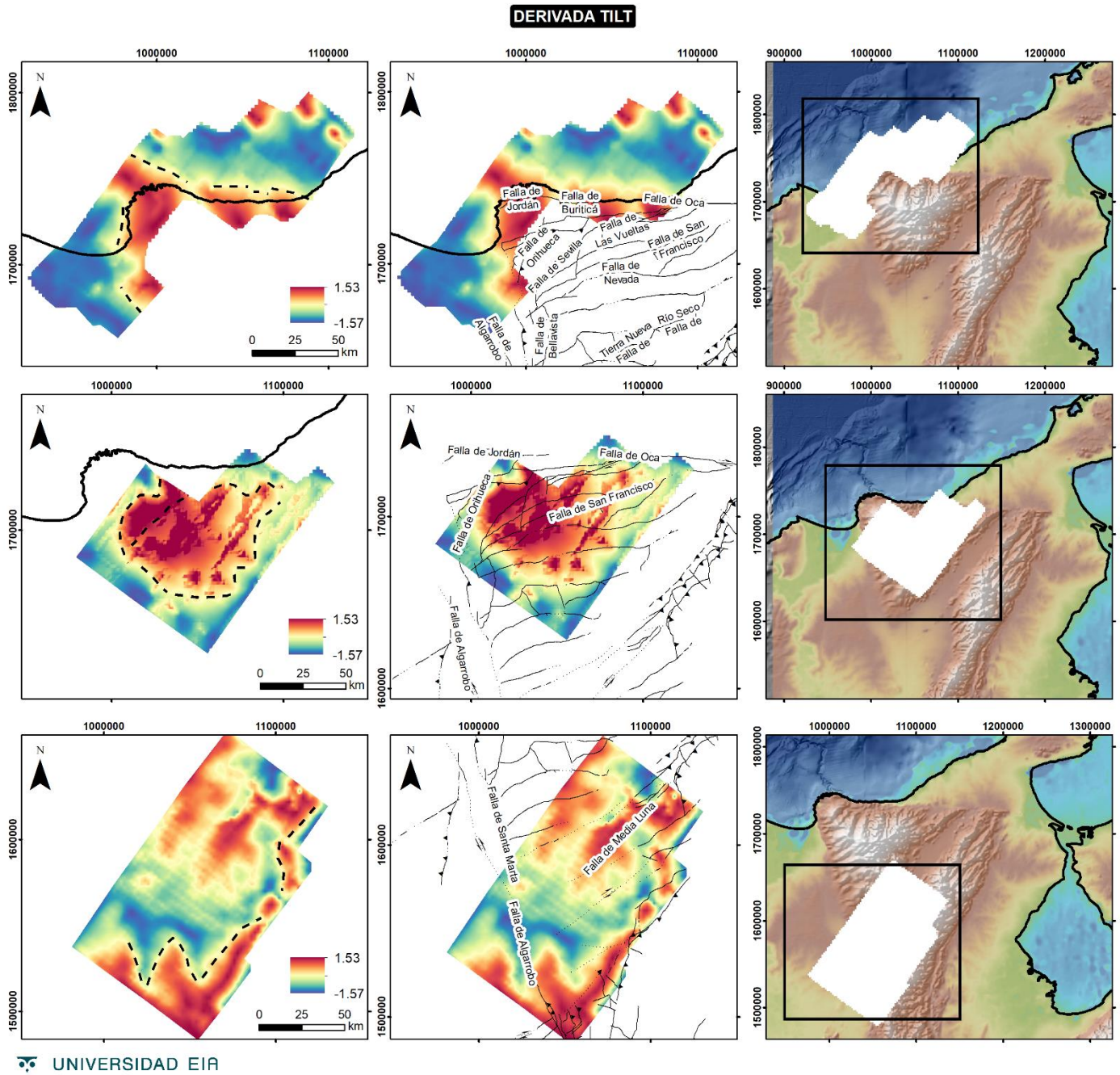


Figura 31. Derivada tilt. Los valores van de -1.56 a 1.56 radianes (equivalente a ± 90 grados), se debe a los valores posibles de tangente inversa. No tiene interpretación cuantitativa, los bordes o estructuras se interpretan cuando el ángulo tilt es cero

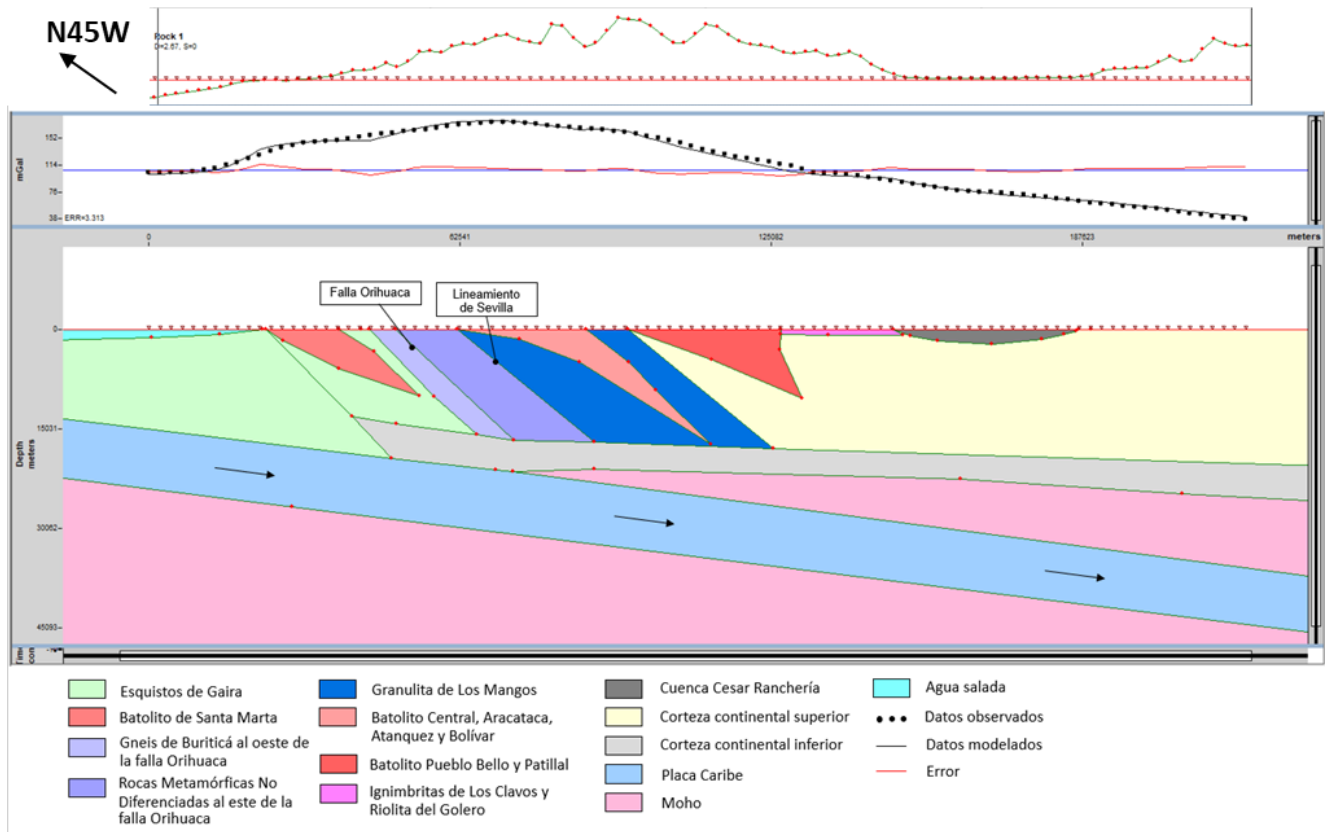


Figura 32. Modelo de la SNSM y cuenca Cesar Ranchería

El modelo geológico-geofísico final (Figura 32) realizado con GM-SYS de Oasis Montaj® (Geosoft Inc, 2007) muestra una placa Caribe subduciendo a bajo ángulo (14° aprox.), un Moho más somero bajo la SNSM (22km aprox.) y un basculamiento regional al este que incluye al Moho y a la corteza continental inferior. Superficialmente los cuerpos intrusivos son mesozonales (profundidad 10km aprox.), las demás unidades integran la corteza continental superior. La Granulita de Los Mangos, el Gneis de Buritaca y las rocas metamórficas no diferenciadas hacen parte del basamento de la SNSM.

Las estructuras identificadas en los atributos gravimétricos se incluyen en el modelamiento. La falla de Orihueca que pone en contacto el Gneis de Buritaca con rocas metamórficas no identificadas. El lineamiento de Sevilla que separaría los gneises y rocas no diferenciadas del Batolito Central (favorecería su emplazamiento) y la Granulita de Los Mangos.

La longitud de onda propuesta para el moho es mayor a 100km puesto que su comportamiento reológico no permitiría deformación o abultamiento a escalas menores. Un moho somero implicaría una anomalía térmica y flujos de calor mayores a los típicos. Este hecho tendría implicaciones en los sistemas petrolíferos de las cuencas adyacentes a la SNSM y podría explicar la presencia de carbones en la cuenca Cesar Ranchería.

Este modelo no requiere el efecto de una raíz cortical como la propuesta por Cediel et al. (2003) para explicar la anomalía, contrario a lo que se esperaría de un macizo compensado isostáticamente. El basculamiento al este, propuesto para ajustar el modelo a la anomalía regional, estaría asociado con el despegue o *detachment* a través del cual se dió el levantamiento del macizo, gracias al movimiento al NW de la subplaca de Maracaibo.

4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo se propone un modelo cortical cuya geometría no incluye un engrosamiento cortical por debajo de la SNSM, toda vez que esto implicaría que el macizo rocoso tiene una compensación isostática, lo cual no es sugerido por la alta anomalía gravimétrica (+200 mGal). Se propone entonces, un modelo con una geometría alternativa que logra un error bajo (~ 3) en el modelamiento geofísico, pero que, sobre todo, permite proponer un modelo geológico alternativo que explicaría la anomalía de Bouguer sobre la SNSM y que aporta al entendimiento de la evolución regional de este macizo.

El modelo no incluye una raíz cortical engrosada, pero si un Moho somero (cuña mantélica) bajo la SNSM, además de un basculamiento regional al sureste que estaría relacionado con el plano de despegue de las estructuras que permitieron el levantamiento de la SNSM. Está fundamentado en el modelo tectónico de Cediel et al. (2003), en el cual la SNSM y la cuenca Cesar Ranchería serían parte de la subplaca de Maracaibo que ha tenido un movimiento al noroeste y bajo la cual ocurre una subducción de bajo ángulo de la placa Caribe.

La conceptualización del modelo involucró la definición de geometrías, densidades y profundidades de los cuerpos. La consideración del mapa geológico en superficie (unidades cronoestratigráficas y fallas) y un marco tectónico con una placa Caribe que subduce a bajo ángulo y un comportamiento reológico de las distintas estructuras de la litósfera permitió el desarrollo de un modelo con sentido geológico, mecánico, reológico, estructural y geofísico.

Un Moho somero implicaría una anomalía térmica y flujos de calor mayores a los típicos. Este hecho tendría implicaciones en los sistemas petrolíferos de las cuencas adyacentes a la SNSM, específicamente en la ventana de generación de hidrocarburos alcanzada, y podría explicar la presencia de carbones bituminosos y antracitas en la cuenca Cesar Ranchería. El gradiente adicional se sugiere, pero no puede comprobarse en este trabajo, podría estudiarse en el futuro incluyéndose el gradiente adicional en el modelamiento geoquímico de la cuenca.

Los atributos gravimétricos permiten resaltar rasgos estructurales y contrastes de densidades que son útiles en las interpretaciones regionales o locales, dependiendo del detalle de los datos. La derivada tilt, señal analítica y derivada generalizada son algoritmos que involucran derivadas espaciales y sus resultados pueden ser más útiles. Los atributos utilizados destacan el lineamiento de Sevilla, la falla de Oca-El Pilar y la falla Santa Marta -Bucaramanga principalmente. La expresión gravimétrica del lineamiento de Sevilla sugiere que este se profundiza, es decir, es un rasgo cortical que divide dos de las provincias propuestas por Tschanz: la de Santa Marta y el cinturón metamórfico de Sevilla. La falla de Oca-El Pilar tiene una expresión discontinua, lo que sugiere que en el flanco norte de la SNSM hay varios bloques en el trazo general de la falla. Estos resultados pueden incluirse en los estudios de neotectónica de la región y en la caracterización sismogénica del norte de Colombia si se integran con estudios sismológicos.

El modelo de Montes et al. (2010) propone una rotación de la SNSM y que este macizo y la cuenca Cesar Ranchería son unidades geológicas independientes que no tienen una génesis común. Una evolución tectónica como la anterior sugeriría la existencia de una estructura en el límite de la SNSM y la cuenca Cesar Ranchería como resultado de su interacción (límite del bloque rotado), la cual no se observa en los atributos gravimétricos.

La relación entre los eventos de exhumación de la SNSM y las facies sedimentarias de los depósitos de la cuenca Cesar Ranchería sugerirían una evolución geológica común para ambos elementos. Se consideran parte de un mismo elemento tectónico, así como lo muestra el modelamiento directo, que correspondería a la subplaca de Maracaibo.

Se observan anomalías que demuestran la utilidad de la gravimetría para interpretaciones regionales como: las anomalías cercanas a cero o negativas en las cuencas sedimentarias y que permiten inferir el depocentro y estructuras como paleoaltos de basamento, fallas, etc., anomalías positivas en la SNSM que no siguen el principio de la anomalía bajo macizos o sistemas montañosos compensados isostáticamente pero que pueden ser explicadas con otros modelos geológicos.

El modelamiento gravimétrico no es suficiente para estimar con mucha confianza la profundidad del despegue, en este trabajo se utiliza un criterio geológico conceptual. Sin

embargo, un modelamiento 3D cuantitativo o la integración de datos gravimétricos y sismológicos permitirían una mejor estimación.

El modelo geofísico no es una solución única, podría proponerse otro modelo que se ajuste a los datos observados, sin embargo, este modelo acoge consideraciones geológicas, geofísicas, estructurales, tectónicas y reológicas.

REFERENCIAS

- ANH (2007). Programa adquisicion procesamiento e interpretacion de datos de aeromagnetogravimetria en las cuencas de Cesar-Ranchería, Alta y Baja Guajira y Alejo. Contrato No: 2070026. Carson Services, Inc./Aerogravity Division 952 Blooming Glen Road Perkasi PA USA 18944.
- Audemard, F. E., & Audemard, F. A. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America–Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics* Volumen 345 Issues 1–4, Páginas 1-26 Consultado el 10 de septiembre de 2018, de [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00218-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00218-9)
- Ayala, C., & Rey, C. (2009). Establecimiento de bases metodológicas para la obtención de cartografía gravimétrica 1:50.000. Capítulo 6: Modelización 2D Y 3D. Consultado el 8 de octubre de 2018, de <https://docplayer.es/30350085-Modelizacion-2d-y-3d.html>
- Bayona, G., Ayala, R. C., Ojeda, C., Cardona, A., Valencia, V., Padrón, C., ... Mesa Salamanca, J. (2009). Estratigrafía y procedencia de las unidades comprendidas entre el Campaniano y el Paleogeno en la subcuenca de Cesar: aportes a la evolución tectónica del área. *Geología Colombiana*, 34(0), 3–34. Consultado el 22 de agosto de 2018, de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/32092>
- Blakely, R. J. (1996). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press. Consultado el 10 de agosto de 2018, de <https://doi.org/10.1017/CBO9780511549816>
- Briceño, L. A., Rey, C., Vargas, C. A., Hernandez, O., & Zamora, J. (2008). Bouguer total anomalies map for Colombia. ANH. Consultado el 25 de julio de 2018, de http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Pais/Documents/bouguer_250_dpi%202008.pdf

- Briggs, I. C. (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, Volumen 39, Número 1, Página 39-48. Consultado el 2 de noviembre de 2018, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.460.1070&rep=rep1&type=pdf>
- Burg, J.-P. (2017). Lithospheric Strength Profiles. *ETH Structural geology: tectonics*. Páginas 21-65. Consultado el 22 de octubre de 2018, de <http://www.files.ethz.ch/structuralgeology/jpb/files/English/2proflitho.pdf>
- Cáceres, C., Molina, J., & Bernal, J. (1981). Informe geológico Final Pozo: El Molino 1X. Informe Geológico 775, Ecopetrol.
- Cardona, A., Valencia, V. A., Bayona, G., Duque, J., Ducea, M., Gehrels, G., ... Ruiz, J. (2010). Early-subduction-related orogeny in the northern Andes: Turonian to Eocene magmatic and provenance record in the Santa Marta Massif and Rancheria Basin, northern Colombia. *Terra Nova*. 1-9. Consultado el 25 de julio de 2018, de <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2010.00979.x>
- Cediel, F., Shaw, R. P., & Cáceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: *AAPG Memoir* 79, p. 815-848. Consultado el 25 de julio de 2018, de <https://doi.org/10.1306/M79877C37>
- Cerón, John F., Kellogg, James N., & Ojeda, Germán Y.. (2007). Basement configuration of the northwestern South America - Caribbean margin from recent geophysical data. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, Volumen 3, Issue 3, Páginas 25-50. Recuperado Julio 08, 2018, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53832007000100002&lng=en&tlng=en.
- Colmenares, F. H., Ana, B., Mesa, M., Jairo, R., Roncancio, H., Edgar, G. (2007). Geología de las planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 33 y 34. Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta. *Geología de las planchas*. Volumen 12. Consultado el 22 de julio de 2018, de

<http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010018162/documento/pdf/2105181621101000.pdf>

Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2006). Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, Volumen 32, Issue 10, Páginas 1585-1591. Consultado el 5 de enero de 2019, de <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2006.02.016>

Del Bosque Espinosa, L., & Hidalgo Moral, E. L. (2014). Estructura cortical del sector centro-este de la Faja Volcánica Trans-Mexicana mediante modelado de perfiles magnetométricos y gravimétricos. Tesis de ingeniería geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Consultado el 10 de enero de 2019, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/4831>

ESRI. (2018). Remuestrear—Caja de herramientas Administración de datos | ArcGIS Desktop. Consultado el 15 de mayo de 2019, de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/data-management/resample.htm>

Flett Rollins, J. (1960). Stratigraphy and structure of the Guajira Peninsula, northwestern Venezuela and northeastern Colombia. Lincoln. Tesis University of Nebraska – Lincoln. Consultado el 5 de enero de 2019, de <https://search.proquest.com/docview/301848917>

García, M., Mier, R., Arias, A. F., Yeny, R., Cortes, M., Mario, P., Salazar, O., Jiménez, M. (2007). Prospectividad de la cuenca Cesar Ranchería. Informe para la Agencia Nacional de Hidrocarburos. Consultado el 10 de octubre de 2018, de http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones-y-Poster-Tcnicos/Cesar_Rancheria.pdf

Geosoft. (2013). GridKnit How-To Guide. Consultado el 10 de noviembre de 2018, de http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Getting_Started_with_montaj_GridKnit.pdf

Gómez Tapias, J., Montes Ramírez, N., Almanza Meléndez, M., Alcárcel Gutiérrez, F., Madrid Montoya, C., & Diederix, H. (2015). Geological Map of Colombia 2015.

Episodes, 40(3), 201–212. Consultado el 25 de julio d 2018, de <https://doi.org/10.18814/epiugs/2017/v40i3/017023>

Geofísica Argentina. (2015). Gravimetría. B° UDAP II Mna F C17 Rivadavia, San Juan, Argentina. Consultado el 4 de mayo de 2018, de <http://geofisicaargentina.com/gravimetria.html>

Hernández, M. (1996). Geología de las planchas 11 Santa Marta y 18 Ciénaga. Consultado el 25 de julio de 2018, de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024387/Documento/pdf/0101243871102000.pdf>

Hinze, W. J., Von Frese, R. R. B., & Saad Frontmatter, A. H. (2013). Gravity and Magnetic Exploration. Cambridge University Press. ISBN 9780511843129. Consultado el 2 de septiembre de 2018, de <https://www.cambridge.org/core/books/gravity-and-magnetic-exploration/20BABB4AAFCD8DC7F4CB36B8359D482>

Hurtado Briceno, O. E., & Leuro Parra, E. (2000). Modelo gravimétrico del espesor de la corteza terrestre en Colombia. Leuro, Volumen 4, Páginas 11–22. Consultado el 5 de mayo de 2018, de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/esrj/article/viewFile/31244/31275>

Lowrie, W. (2013). Fundamentals of Geophysics, Second Edition. Swiss Federal Institute of Technology, Zürich. Cambridge University Press. ISBN 9780511807107. Consultado el 22 de mayo de 2018, de <http://ebooks.cambridge.org/ebook.jsf?bid=CBO9780511807107>

Marescot, L. (2005). Gravity Surveying. Consultado el 10 de febrero de 2019, de <https://www.geophysik.uni-muenchen.de/~jowa/notes/gravimetry>

Martínez del Olmo, W. (2009). El geólogo en la exploración y producción de hidrocarburos. En La profesión de geólogo. Páginas 97-121. Consultado el 5 de mayo de 2018, de https://www.u-cursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/La_profesion_d_e_geologo_%28Espana%29.pdf

- Montes, C, Bayona, G., Jaramillo, C., Ojeda, C., Molina, M., & Herrera, F. (2005). Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar- Rancheria valley: Rigid-beam pivot model, 520–523. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona), Extended Abstracts: Páginas 520-523. Consultado el 5 de septiembre de 2018, de http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-03/010040292.pdf
- Montes, Camilo, Guzman, G., Bayona, G., Cardona, A., Valencia, V., & Jaramillo, C. (2010). Clockwise rotation of the Santa Marta massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Ranchería basins. *Journal of South American Earth Sciences*, Volumen 29, Issue 4, Páginas 832–848. Consultado el 2 de septiembre de 2018, de <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.010>
- NASA. (2004). Gravity Anomaly Maps and The Geoid: Grace. Recuperado el 4 de mayo de 2018, de <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/GRACE/page3.php>
- Northwest Geophysical Associates. (2004). User's Guide GM-SYS ® User's Guide Revision 4. Consultado el 5 de enero de 2019, de http://pages.geo.wvu.edu/~wilson/gmsys_49.pdf
- Restrepo, I., Arismendy, R., Kairuz, E., Cuevas, R., Robles, J., Moreno, L., ... Osorio, J. (2017). Interpretación de la configuración del basamento del Caribe colombiano mediante el análisis de métodos potenciales. XVI Congreso Colombiano de geología. Santa Marta Colombia.
- Sanchez-Rojas, J., & Palma, M. (2014). Crustal density structure in northwestern South America derived from analysis and 3-D modeling of gravity and seismicity data. *Tectonophysics*, Volumen 634, Páginas 97–115. Consultado el 30 de septiembre de 2018, de <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.07.026>
- Sanchez, J., & Mann, P. (2014). Integrated Structural and Basinal Analysis of the Cesar–Rancheria Basin, Colombia: Implications for its Tectonic History and Petroleum Systems. En *Memoir 108: Petroleum Geology and Potential of the Colombian*

Caribbean Margin. AAPG. Páginas 431- 470. Consultado el 10 de octubre de 2018, de <https://doi.org/10.1306/13531945M1083648>

Swain, C. J. (1976). A FORTRAN IV program for interpolating irregularly spaced data using the difference equations for minimum curvature. *Computers & Geosciences*, Volumen 1, Issue 4, Páginas 231–240. Consultado el 12 de noviembre de 2018, de [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(76\)90071-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(76)90071-6)

Telford, W. M. N., P. Geldart, L., & E. Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. En *Applied Geophysics*, by W. M. Telford and L. P. Geldart and R. E. Sheriff, pp. 790. ISBN 0521339383. Cambridge, UK: Cambridge University Press, October 1990. Consultado el 5 de enero de 2019.

Tschanz, C. M., Marvin, R. F., Cruz B., J., Mehnert, H. H., & Cebula, G. T. (1974). Geologic Evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, Volumen 85, Issue 2, Páginas 273 - 284. Consultado el 20 de mayo de 2018, de [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1974\)85<273:GEOTSN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1974)85<273:GEOTSN>2.0.CO;2)

University of California. (2019). *Satellite Geodesy at the Scripps Institution of Oceanography*. Consultado el 25 de mayo de 2019, de <https://topex.ucsd.edu/index.html>

Villagómez, D., Spikings, R., Mora, A., Guzmán, G., Ojeda, G., Cortés, E., & van der Lelij, R. (2011). Vertical tectonics at a continental crust-oceanic plateau plate boundary zone: Fission track thermochronology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Tectonics AGU 100*, Volumen 30, Issue 4. Consultado el 5 de octubre de 2018, de <https://doi.org/10.1029/2010TC002835>

Watts, A. B. (2001). *Isostasy and Flexure of the Lithosphere*. Department of Earth Sciences, Oxford University. Cambridge University Press. ISBN 052162272-7. Consultado el 5 de abril de 2018, de http://geofaculty.uwyo.edu/dueker/GeophysicsClass/watt_isostasy_flexure_chap-1_HISTORY.pdf

